Amanda Fernandes Pereira da Silva
(ORGANIZADORA)

INGENIERÍA

Desenvolvimiento de procesos y productos

Amanda Fernandes Pereira da Silva
(ORGANIZADORA)

INGENIERÍA

Desenvolvimiento de procesos y productos

Ano 2023

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Camila Alves de Cremo
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Ingeniería: desenvolvimiento de procesos y productos

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Amanda Fernandes Pereira da Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

I46 Ingeniería: desenvolvimiento de procesos y productos / Organizadora Amanda Fernandes Pereira da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1369-1
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.691232704

1. Ingeniería. I. Silva, Amanda Fernandes Pereira da (Organizador). II. Título.

CDD 620

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

Este libro denominado “Ingeniería: Desarrollo de procesos y productos”, señala las tendencias de sustentabilidad que consisten en promover el uso de nuevos productos “verdes” aplicables en la industria. Los trabajos científicos guiados en esta colección incluyen: síntesis de procesos, su análisis con optimización y producción de nuevos materiales. La búsqueda del enfoque apropiado que tenga soluciones razonables para resolver problemas es el enfoque principal de este trabajo.

La ingeniería que implementa prácticas sustentables es la de procesos y productos, donde se eligen materiales que favorecen a la industria de manera sustentable. Por tanto, el desarrollo de procesos y productos químicos requiere de una actividad económica industrial como medida eficiente para promover la sostenibilidad. Definir, planificar e implementar una metodología de sistemas para la resolución de problemas.

Ante este contexto, la sustentabilidad industrial es la principal tendencia para el medio ambiente, la sociedad y las empresas. Por ello, los trabajos académicos que se han desarrollado buscan integrar los beneficios generando una mayor conciencia ambiental, aprovechando los incentivos y configurando el aprendizaje basado en problemas para ampliar el equilibrio entre lo ambiental y la producción rentable.

Amanda Fernandes Pereira da Silva

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

ANÁLISE DO USO DA COLA BRANCA EM ARGAMASSA CONVENCIONAL

Suzana Danta Sousa
Amanda Fernandes Pereira da Silva
Alefen Silva de Sousa
João Braz Araújo Neto
Danilo Teixeira Mascarenhas de Andrade

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327041

CAPÍTULO 2 16

ANÁLISIS DE LA TENACIDAD AL DESGASTE DE LAS ARTICULACIONES COXOFEMORALES DE PACIENTES AFECTADOS POR OSTEOPOROSIS

Jose Luis Soto Trinidad
Ley Natanael Mercedes Montero

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327042

CAPÍTULO 3 35

COMPARACIÓN DE MODELOS FÍSICOS EN LABORATORIO

Víctor Manuel Ortiz Martínez
Juan César Luna Bahena
Jesús Gracia Sánchez
José Luis Herrera Alanís
Eliseo Carrizosa Elizondo
Javier Osnaya Romero
Víctor Franco

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327043

CAPÍTULO 4 42

DISEÑO DE NUEVA ESTACIÓN ELEVADORA DE AGUA DE LA ZONA SUR DE CÓRDOBA

Teresa Reyna
Santiago Reyna
Fabián Fulginiti
María Lábaque
César Riha
Tatiana Penza
Maria Fernanda Funes

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327044

CAPÍTULO 5 56

EDUCACIÓN Y CULTURA DEL AGUA EN LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Josefina Ortiz Medel
María Lina Fuentes Galván

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327045

CAPÍTULO 6 62

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA ARTICULACIÓN DE CADERA AFECTADA POR DESCALCIFICACIÓN ÓSEA EMPLEANDO MÉTODOS FRACTALES

Jose Luis Soto Trinidad

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327046

CAPÍTULO 7 81

IMPORTANCIA FUNDAMENTAL DE LA VELOCIDAD DE CORTE PARA LOS PROCESOS DE MECANIZADO Y RECTIFICADO EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA METALMECÁNICA

Jayanta Banerjee

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327047

CAPÍTULO 8 93

USO DA MANUFATURA ADITIVA NA PROTOTIPAGEM RÁPIDA E VANTAGENS FRENTE À PROCESSOS DE USINAGEM: UM ESTUDO DE CASO

Victor Abreu dos Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327048

CAPÍTULO 9 107

UTILIDAD DE LA BIOMASA DEL HONGO *Purpureocillium lilacinum* PARA LA ELIMINACIÓN DE CADMIO (II) DE AGUAS CONTAMINADAS

Ismael Acosta Rodríguez

Adriana Rodríguez Pérez

Juan Fernando Cárdenas González

Víctor Manuel Martínez Juárez

Dalila del Socorro Contreras Briones

https://doi.org/10.22533/at.ed.6912327049

SOBRE A ORGANIZADORA 115

ÍNDICE REMISSIVO..116

ANÁLISE DO USO DA COLA BRANCA EM ARGAMASSA CONVENCIONAL

Data de aceite: 03/04/2023

Suzana Danta Sousa

Amanda Fernandes Pereira da Silva

Alefen Silva de Sousa

João Braz Araújo Neto

Danilo Teixeira Mascarenhas de Andrade
Construção Civil – Prof. Me

RESUMO: O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de emprego do aditivo cola branca (ou PVAc) à argamassa (cimento e areia) para assentamento. Foram efetuados ensaios de consistência de mesa na qual se verificou as propriedades no estado fresco como a trabalhabilidade. No estado endurecido, verificou-se os desempenhos através dos ensaios de resistência de aderência à tração e resistência à compressão utilizando corpo de prova de 5x10cm. Neste último, foram confeccionados corpos de prova para a argamassa convencional e argamassa com substituição de 2,5% e 5%, em relação a 1kg de massa de cimento, por cola branca. A análise deste ensaio foi em relação aos 14 dias de idade. Os resultados dos ensaios demonstraram aderência e trabalhabilidade adequadas indicando uma eficiência de uso desse aditivo em argamassas convencionais. Pode-se notar que dentre as argamassas analisadas, a adição de 50g de cola à argamassa é a que demonstrou maior desempenho com uma consistência média de 243,99mm enquanto na convencional obteve-se 155,41mm. Além disso, a adição de 100g de cola ao teste de resistência ao arranque por tração mostrou a melhor resistência a aderência, mas não pôde obter os resultados precisos no ensaio devido ao tipo de ruptura. No entanto em relação às resistências à compressão não houve diferença significativa com a presença de cola branca, apresentando resultado inferior a 8,96 MPa.

PALAVRAS-CHAVE: PVAc. Cola branca. Argamassa convencional. Construção civil.

1 I INTRODUÇÃO

Sabe-se que as argamassas têm grande emprego na construção civil devido, principalmente, às características mecânicas, ao baixo custo, facilidade de utilização e durabilidade. Desde o início de sua utilização, tanto os materiais

utilizados como as características desejadas, sofreram muitas alterações. Desse modo, na tentativa de melhorar, ou mesmo alterar as características dessa argamassa a aplicação de polímeros com esse fim passou a ser comum. Objetivando sempre atender a duas condições básicas e importantes, que são as de exposição durante a aplicação (tempo em aberto) e as condições permanentes durante a vida útil (JOSÉ, 2012).

Sendo a argamassa um produto homogêneo constituído de aglomerante hidráulico (cimento Portland), agregados minerais (geralmente areia) e água, contendo ou não aditivos, a presença de aditivos retentores de água garante o seu bom desempenho, melhor trabalhabilidade, maior adesividade e flexibilidade às argamassas. Dentre os aditivos que podem ser utilizados tem-se o PVAc (acetato de polivinilo) ou "cola branca" (HERCULES E UNION CARBIDE, 1997).

O PVAc é um adesivo (ou polímero) sintético, resistente e difícil de remover que misturado com a água de reparo da argamassa proporciona às argamassas de revestimento, reboco, regularização de pisos, entre outras situações em que se aplica um determinado revestimento para uma superfície, alta aderência.

A utilidade desse polímero em materiais cimentícios é devido aos seus altos valores de módulo de elasticidade e de deformação (KANAMOTO, et al., 1990), mesmo que esses fatores estejam diretamente relacionados com o peso molecular, viscosidade, o grau de polimerização e a capacidade de realizar hidrólise, que variam de acordo com as características das diferentes moléculas de PVA (BRISCOE, et al., 2000; TAO, 2003).

Segundo Tao (2003), como o acetato de polivinilo se trata de uma solução aquosa, há alguns fatores que não dependem diretamente das características da molécula usada, mencionadas anteriormente, mas de características da solução polimérica que vão influenciar o tipo de alteração criada pela adição de PVA. Essas soluções com diferentes propriedades influenciam o comportamento do material cimentício com relação ao nível de homogeneidade da mistura (a execução do processo de misturar os diferentes componentes como o cimento, o agregado e a água com a cola). Existem diversos estudos relacionados com o uso da cola branca em argamassas, com o intuito de melhorar as propriedades do cimento Portland como ligante.

É importante frisar que, sabendo que o cimento é um aglomerante e na sua composição as matérias primas principais são calcário e argila, o mesmo não produz resíduo sólido diretamente, mas possui uma alta emissão de gases poluentes no meio ambiente provenientes da queima na produção do clínquer. A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO2. A produção do material é responsável pelos impactos à saúde como doenças pulmonares graves, além da irritação dos olhos, ouvidos e fossas nasais, quanto ao meio ambiente, estes desencadeiam-se desde a contaminação do ar, na britagem da pedra calcária, até o ensacamento do produto final (CSI, 2002).

A extração das matérias primas pode gerar impactos físicos como desmoronamentos nas pedreiras de calcário e erosões devido às vibrações produzidas no terreno, aprofundamento dos cursos d'água diminuindo a quantidade da mesma e consequentemente afetando a biodiversidade das regiões. O cimento é um fator importante na construção, mas é necessária desenvolver alternativas sustentáveis que possam ajudar a diminuir os impactos ambientais (CSI, 2002).

Assim, na construção civil, como a cola branca quando adicionada à argamassa confere flexibilidade, diminui o índice de retração e a permeabilidade, melhora a resistência coesiva (evita o escorrimento) e apresenta alto teor de sólidos garantindo elevado rendimento é vista como uma possibilidade de alternativa viável para diminuir o consumo de cimento em argamassas utilizando a mesma como substituta parcial.

Em face ao exposto, este presente trabalho tem por função avaliar a influência do aditivo PVAc nas propriedades do estado fresco e endurecido em argamassas convencionais, onde substituiu-se a massa cimentícia por cola branca com porcentagens equivalentes a 2,5% e 5%.

2 | PROCESSO LABORATORIAL

Como dito anteriormente, nesse estudo pretende-se avaliar os efeitos e a viabilidade da incorporação de PVAc (acetato de polivinilo) ou "cola branca" à argamassa convencional. Nesta etapa, são apresentados os materiais utilizados e logo em seguida os métodos realizados nos diferentes ensaios efetuados.

2.1 Materiais

2.1.1 Cimento

O cimento utilizado no ensaio foi do tipo CPII-E32, contém adição de escória granulada de alto-forno, que proporciona baixo calor de hidratação. Apresenta uma composição de 94% a 56% de clínquer mais gesso e 6% a 34% de escória, podendo ou não ter a adição de material carbonático com o limite máximo de 10% em massa. Este cimento tem melhor resistência ao ataque dos sulfatos (JOSÉ, 2016).

2.1.2 Água

A água referente ao experimento foi disponibilizada no laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Santo Agostinho, em Teresina (PI).

2.1.3 Areia

A areia empregada foi fornecida no laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Santo Agostinho, em Teresina (PI).

2.1.4 PVAc ou cola branca

O PVAc (acetato de polivinila) utilizado foi cola branca da marca Koala. Para a utilização do PVAc nas argamassas, primeiramente foi preparada uma solução aquosa, tendo sido misturado com 0,5 ml de água, pois foi com essa concentração que se percebeu a diluição da mesma. Este processo foi executado em cada traço que houve a incorporação desse aditivo.

3 I MÉTODOS

3.1 Traços estudados

O traço utilizado foi 1:3 (cimento:areia) para todos os ensaios, utilizando 500g de cimento e 1500g de areia para todas as frações e 250ml de água, isto é, com fator a/c de 0,50. A cola foi analisada no experimento de duas maneiras: na primeira empregou-se 25g de cola em substituição a 25g de cimento e na segunda, 50g de cola em substituição a 50g de cimento. Lembrando que, como dito anteriormente, em todo o uso da cola nos ensaios diluiu-se a mesma em meio aquoso para melhorar o processo de mistura.

3.2 Análise granulométrica

O ensaio para a determinação da composição granulométrica da areia foi realizado segundo as prescrições da NBR 7217:1987. A Tabela I abaixo mostra os resultados adquiridos com o ensaio de peneiramento. Logo mais, com base nesses resultados, pôde-se realizar a curva granulométrica (Figura 1) de caracterização física dessa areia e, por consequência, obteve-se o seu módulo de finura que é apresentado na Tabela II.

Peneiras		Total inicial	2000	Total retido	1996
nº	mm	Peso retido (g)	% Retida	% Retido acumulado	
3,8”	9,5	9	0,45	0,25	9,5
4	4,8	15	0,75	1	4,8
8	2,6	38	1,9	2,91	2,6
16	1,2	21	1,05	3,96	1,2
30	0,6	106	5,31	9,27	0,6
50	0,3	1312	65,73	75	0,3
100	0,15	474	23,75	98,75	0,15
Fundo		21			

Tabela I – Resultados do ensaio de peneiramento

Fonte: Próprio autor, 2018
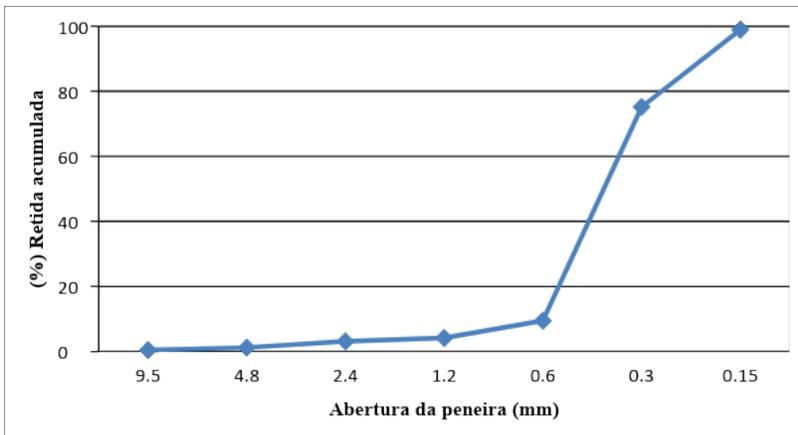
Figura 1 – Curva Granulométrica

Fonte: Próprio autor, 2018

Módulo de finura	1,9
Diâmetro máximo	1,2 mm
Inferior 1,55 < MF < 2,20 fina	
Ótimo 2,20 < MF < 2,90 média	
Superior 2,9 < MF< 3,5 grossa	

Tabela II – Módulo de finura da areia

Fonte: Próprio autor, 2018

Com base nos resultados, concluiu-se que a areia utilizada em todas as argamassas é fina, pois seu módulo de finura (MF) é igual a 1,9 e conferindo-se a classificação da Tabela II, a mesma adequa-se à classificação de areia fina com zona utilizável inferior, classificação esta baseada na NBR 7211:2005.

Como a dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, através da Tabela de resultados I, podemos analisar que a peneira de 1,2 mm é que corresponde ao diâmetro máximo do agregado por ser a última porcentagem retida acumulada obtida (no valor de 3,96%).

3.3 Caracterização no estado fresco

Para a caracterização da argamassa no estado fresco foi avaliada a consistência. Foi realizado o ensaio de espalhamento segundo a norma NBR 13276:2005. Para a realização do ensaio limpou-se a mesa de espalhamento e lubrificou-se com óleo, colocou-se argamassa de forma a preencher metade do molde e com o soquete compactou-se a argamassa com 15, 10 e 5 pancadas consecutivas. No final, retirou-se a argamassa em excesso, retirou-se o molde e obteve-se o espalhamento medindo o diâmetro em três

direções perpendiculares.

3.4 Resistência à compressão

Realizado o ensaio de consistência, moldou-se 3 corpos de prova de argamassa convencional com 500g de cimento, 1500g de areia e 250ml de água, 3 corpos de prova de argamassa com 475g de cimento, 1500g de areia, 25g de cola e 250ml de água e 3 corpos de prova com 450g de cimento, 1500g de areia, 50g de cola e 250ml de água, totalizando 9 corpos de prova que foram moldados (Figura 2) para a realização de ensaio de resistência à compressão simples. Para realizar este ensaio de caracterização no estado endurecido foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 5x10cm (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) de dimensões, e seguiu-se as prescrições da norma NBR 7215:1996. Para efeito de cálculo da resistência usou a fórmula a seguir.

$$\mathbf{R}= \frac{F}{A}$$

Onde, R = Resistência à compressão em MPa;

F = Carga máxima em N;

A = Área da seção em mm.

O ensaio foi feito em relação aos 14 dias de cura dos corpos de prova.

Figura 2 – Corpos de prova de argamassa com 50g de cola

Fonte: Próprio autor, 2018

3.5 Resistência de aderência à tração

Ademais dos ensaios de caracterização das argamassas propriamente dito, também foram realizados ensaios para a verificação de resistência de aderência à tração seguindo as diretrizes da norma NBR 13528:1995. Serra de copo, para realizar cortes cilíndricos até a base; cola à base de resina epóxi para estabelecer ponte de aderência entre as pastilhas

metálicas de seção circular e a argamassa, foram algumas das principais ferramentas utilizadas.

Previamente a base foi isenta de todas as impurezas, sendo esta de alvenaria de vedação presente no laboratório de Materiais de Construção Civil na sede do Centro Universitário Santo Agostinho (Teresina-PI). O procedimento abrange: após 14 dias de aplicação das argamassas.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido, as características dos traços das argamassas confeccionadas, apresentam-se a seguir.

4.1 Ensaio de consistência

Os resultados obtidos no ensaio de consistência das argamassas (ver Figura 3) encontram-se na Tabela III.

Amostras	1º Amostra (mm)	2º Amostra (mm)	3º Amostra (mm)	Média (mm)
Convencional com 250ml de água	178,63	157,67	129,96	155,41
Argamassa com 25g de cola e 250ml de água	209,66	215,41	213,38	212,82
Argamassa com 50g de cola e 250ml de água	242,32	238,75	250,91	243,99

Tabela III – Resultados da determinação do índice de consistência

Fonte: Próprio autor, 2018

Avaliou-se a trabalhabilidade das argamassas convencional em comparação das amostras com adição de 25g e 50g de cola em substituição do cimento nesta proporção. Portanto com os resultados apresentados na Tabela II, pode ser observado um aumento no índice de consistência das argamassas à medida que houve um aumento na dosagem de cola adicionado na mesma, dessa forma resultando em uma consistência mais fluida em comparação com a convencional, demonstrando uma melhor trabalhabilidade. Este fato ocorre devido a adição de acetato de polivinila (PVA) de alta viscosidade, funcionado como agente plastificante.

Figura 3 – Consistência: a) convencional; b) argamassa com 25g de cola e c) argamassa com 50g de cola

Fonte: Próprio autor, 2018

4.2 Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos

Na Figura 4 demonstra o comportamento da resistência média dos corpos de prova cilíndricos, em função do traço da argamassa. A Tabela IV retrata os valores encontrados no referido ensaio.
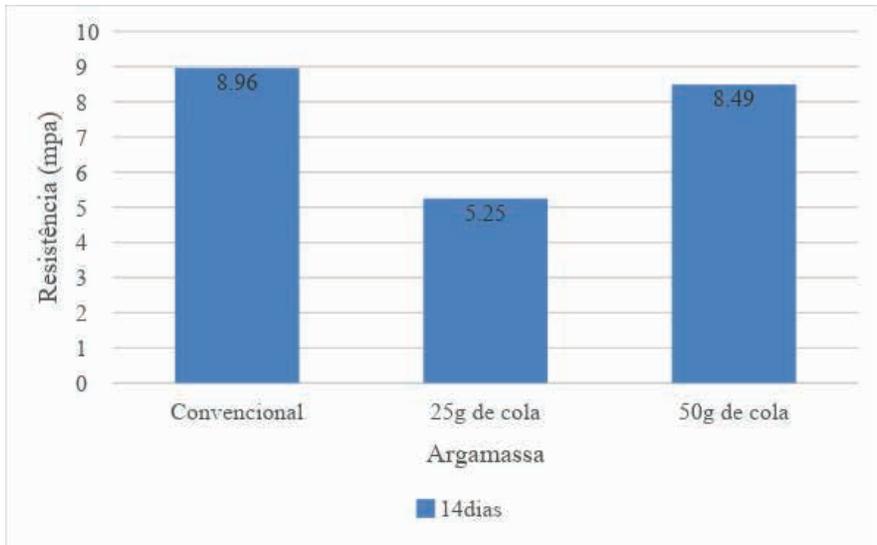
Figura 4 – Comparação das resistências à compressão das argamassas

Fonte: Próprio autor, 2018

Corpo de prova	Tensão 1 (MPa)	Tensão 2 (MPa)	Tensão 3 (MPa)	Média (MPa)
Convencional com 250ml de água	7,19	12,14	7,54	8,96
Argamassa com 25g de cola e 250ml de água	4,60	5,10	6,04	5,25
Argamassa com 50g de cola e 250ml de água	8,44	9,34	7,69	8,49

Tabela IV – Resultados da determinação da resistência à compressão

Fonte: Próprio autor, 2018

Observando-se por intermédio da análise dos resultados expostos na Figura 4, a resistência à compressão apresentou uma redução, quando comparado às argamassas em que foi adicionando PVA com a composição convencional. A baixa resistência apresentada pelas composições em que se adicionou acetato de polivinila pode ser devido a compacidade da argamassa ser baixa, ou seja, a incorporação do aumento de vazios e menor consumo de cimento.

Pode-se evidenciar que a argamassa com composição de 50g de cola, para o traço avaliado, mostraram comportamento similar à compressão em relação a resistência à compressão da argamassa convencional. Na Figura 5 e 6 tem-se o rompimento dos corpos de prova de argamassa convencional rompidos, respectivamente.

Figura 5 – Rompimento dos corpos de prova convencionais

Fonte: Próprio autor, 2018

Figura 6 – Corpos de prova convencionais rompidos

Fonte: Próprio autor, 2018

4.3 Ensaio de arrancamento das argamassas

As Tabelas V, VI e VII demonstram a tensão máxima que um corpo de prova de revestimento suporta, de cada traço das argamassas estudadas, na interface analisada, quando submetida um esforço normal sobre a mesma.

Corpo de prova convencional	Carga (N)	Seção (mm2)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura	Taxa de carga
1	470	1699	>0,28	b	25
2	137	1715	>0,1	b	5
3	559	1707	>0,33	b	25

Tabela V – Resultados obtidos no ensaio de arrancamento da argamassa convencional

Fonte: Próprio autor, 2018

Corpo de prova 50g	Carga (N)	Seção (mm2)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura	Taxa de carga
1	706	1578	>0,45	b	25

Tabela VI – Resultados obtidos no ensaio de arrancamento da argamassa com adição de 50g de cola

Fonte: Próprio autor, 2018

Corpo de prova 100g	Carga (N)	Seção (mm2)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura	Taxa de carga
1	647	1610	>0,40	b	25
2	735	1581	>0,46	b	25
3	451	1658	>0,27	b	25

Tabela VII - Resultados obtidos no ensaio de arrancamento da argamassa com adição de 100g de cola

Fonte: Próprio Autor, 2018

É importante ressaltar que, o traço de 250ml de água (fator a/c de 0,5), 500g de cimento, 1500g de areia não apresentou trabalhabilidade suficiente para aderir ao substrato devido a sua consistência farofada [Figura 3 – a)]. Diante disso, foi necessário mudar a proporção de água para 300ml e dobrar as quantidades dos componentes, formando um novo traço para a argamassa convencional e as argamassas com a cola.

A primeira situação é a da Tabela V que retrata como estudo a argamassa convencional, apresentando um novo traço de 1:3 com 600ml de água e um fator a/c de 0,6. A resistência da aderência à tração não foi determinada e esta é maior que a média das resistências registradas no ensaio de 0,24 MPa, devido a ruptura na argamassa de revestimento.

A segunda situação é a da Tabela VI que utilizou a adição de 50g de cola a argamassa e um traço de 950g de cimento, 3000g de areia, 600ml de água e um fator a/c de 0,63. Este ensaio apresentou apenas 1 corpo de prova como objeto de estudo com uma resistência de 0,45 MPa, os outros 2 corpos foram descartados devido ao rompimento ser na interface da cola/pastilha (ver Figura 7), não proporcionando resultados precisos para estudo.

A terceira situação é a da Tabela VII, argamassa com 100g de cola e um traço de 900g de cimento, 3000g de areia, 600ml de água e fator a/c de 0,67. O estudo deste ensaio foi feito com os 3 corpos de prova rompido na argamassa de revestimento (ver

Figura 8), proporcionando uma resistência média maior que 0,38 MPa, mas não pode ser determinada.

Observa-se, em todas as composições finais analisadas, ao aplicar o esforço de tração perpendicularmente ao corpo de prova até sua ruptura, utilizou a mesma taxa de carregamento de 25 para as situações analisadas.

Figura 7 – Ensaio de aderência à tração do corpo de prova com 50g de cola

Fonte: Próprio autor, 2018

Figura 8 – Ensaio de aderência à tração do corpo de prova com 100g de cola

Fonte: Próprio autor, 2018

Em vista dos resultados obtidos, analisando a Figura 9 abaixo, nota-se que em termos de resistência da argamassa com o substrato, a argamassa com 100g de cola demonstrou melhor resistência a aderência à tração no ensaio do que as demais argamassas, contudo devido ao tipo de ruptura, segundo a NBR 13528 (1995) a resistência de aderência tem que ser maior que a resistência de ensaio e não pode ser determinada.
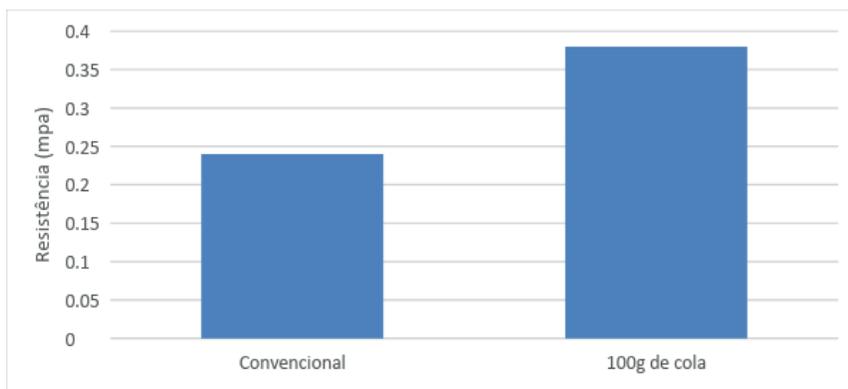
Figura 9 – Comparação das resistências de aderência à tração

Fonte: Próprio autor, 2018

5 I CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando o comportamento das argamassas modificadas pela incorporação de PVA enquanto substituto parcial do cimento, pode-se apontar alguns pontos a seguir que evidenciaram a interferência desse aditivo como alternativa na melhoria das características principais de argamassas.

Devido à viscosidade característica do PVA, a argamassa com 50g de cola permitiu que esta tornasse mais trabalhável e com facilidade maior de manuseio em comparação com a convencional que se apresentou com uma consistência farofada;

Mesmo com a melhora na trabalhabilidade, o aumento e uso do aditivo não demonstrou diferenças significativas no quesito de resistência à compressão simples devido a uma compacidade menor com 25% e 50% de cola em relação à convencional. Por sua incorporação normalmente implicar um aumento de ar incorporado na argamassa;

Com relação à resistência de aderência, a argamassa com 100g de cola apresentou a aderência mais adequada demonstrando que essa propriedade é aperfeiçoada pelo o aumento do uso do PVA.

Assim, o uso de cola branca em argamassas, de acordo com os ensaios, demonstra eficiência em propriedades como aderência e trabalhabilidade. As resistências mecânicas sofreram influência ao serem aditivadas mesmo em pequenas quantidades, porém o efeito nem sempre pode trazer melhoria considerável em relação à argamassa convencional.

Desse modo, a utilização desse material como substituto parcial do cimento é muito propícia e representa um novo setor para a indústria da construção, configurando-se como um produto de menor impacto ambiental e por sua vez à saúde humana, já que o cimento é um componente substancialmente poluente tanto para o âmbito ambiental como humano e é importante diminuir o seu consumo em prol do bem-estar comum.

O ensaio de arrancamento com o traço de 1:3:0,5 não foi realizado, pois não apresentou consistência suficientemente eficiente para aderir à base e este estudo foi em relação aos 14 dias, onde o alcance de resistência máxima é obtido aos 28 dias, estas são algumas das restrições obtidas no trabalho realizado. Desta forma, é recomendado para trabalhos futuros analisar às argamassas com relação aos 28 dias para obter-se resultados mais expressivos, pois o tempo de cura influencia no desempenho, e com os traços onde a proporcionalidade da quantidade dos componentes confiram trabalhabilidade definida.

Como esse campo é pouco explorado e imenso, os resultados deste trabalho muito podem vir a servir como base para pesquisas futuras e vir a contribuir com o desempenho de futuras construções.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 1987.

______. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

______. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

______. NBR 7215: Determinação da resistência à compressão – cimento Portland. Rio de Janeiro, 1996.

______. NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

BRISCOE, B., Luckham, P. & Zhu, S. The effects of hydrogen bonding upon the viscosity of aqueous poly(vinyl alcohol) solutions. Polymer, 2000.

CEMENT SUSTAINABLE INITIATIVE. Como ocorre o processo de produção do cimento e quais são seus impactos ambientais. 2002. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1569-processo-de-producao-do-cimento-gera-emissoes-e-pode-diminuir-biodiversidade.html> Acesso em: 19 jun. 2018.

HERCULES. Culminal para cementos cola. Folder, 1997.

JOSÉ, P. C. Betões e Argamassas Modificados com Incorporação de PVA. Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2012.

JOSÉ, V. de P. A. Cimento Portland com escória de alto forno, empreendedorismo, inovação e sustentabilidade. Universidade de Uberaba, 2016. Disponível em: <https://www.uniube.br/eventos/entec/2016/arquivos/aprovados/21.pdf> Acesso em: 19 jun. 2018.

KANAMOTO, T., Kiyooka, S. & Tovmasyan, Y. Effect of molecular weight on drawing poly (vinyl alcohol) from solution-grown crystal mats. Polymer, 1990.

TAO, J. Effects off Molecular Weight and Solution Concentration on Electrospinning of PVA. Worcester: s.n, 2003.

UNION CARBIDE. Cellosize. HEC. Versatilidade para a construção civil: aplicação em argamassas adesivas. Folder, 1997.

Bibliografia Consultada

ADITIVO PVA CONCENTRADO PARA ARGAMASSA E CONCRETO. Disponível em: <http://www.useafix.com/produto/index.php?c=38&produto=aditivo-pva-concentrado-para-argamassa-e-concreto#sthash.Vedrrego.a1kbNK0C.dpbs> Acesso em: 19 maio 2018.

ADESIVO PVA CONCENTRADO PARA ARGAMASSAS E CHAPISCOS. Disponível em: <https://bra.sika.com/pt/solucoes-produtos/construcao/reparo-reforco-e-protecao-do-concreto/adesivos-para-argamassas-e-chapiscos/grupo-de-produtos-adesivos-para-argamassas-e-chapiscos/adesivo-pva-concentrado-para-argamassas-e-chapiscos.html> Acesso em: 19 maio 2018.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA TENACIDAD AL DESGASTE DE LAS ARTICULACIONES COXOFEMORALES DE PACIENTES AFECTADOS POR OSTEOPOROSIS

Data de aceite: 03/04/2023

Jose Luis Soto Trinidad
Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana
ORCID: 0000-0001-5343-0985

Ley Natanael Mercedes Montero
Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana

RESUMEN: En la Republica Dominicana la osteoporosis está afectado a muchas personas. Esta enfermedad ataca la estructura del tejido óseo causándole un trastorno esquelético caracterizado por la pérdida de masa, desgaste y fractura frágil. En este estudio se analizaron las articulaciones coxofemorales de mujeres porque existe un movimiento relativo entre sus elementos formando sistemas tribológicos que trabajan con precisión y eficiencia; pero, los esfuerzos, la fricción y el desgaste en esta zona afectan su movilidad y resistencia. Por esta razón, a través de métodos tribológicos se evaluaron la tenacidad al desgaste de las articulaciones de 41 mujeres. Como resultados, se obtuvieron la tasa y resistencia al desgaste a la erosión y adhesión de las articulaciones de cadera. Observándose que la tasa de desgaste adhesiva en las pacientes es mayor que la erosiva y a medida que estas tasas se incrementan en transcurso del tiempo reflejan como consecuencia las condiciones de osteopenia y osteoporosis. Por ende, la resistencia de los tejidos disminuye.

PALABRAS CLAVE: Tenacidad al desgaste; tasa de desgaste; osteoporosis; osteopenia; articulaciones coxofemorales.

ANALYSIS OF THE WEAR TENACITY OF THE COXOFEMORAL JOINTS OF PATIENTS AFFECTED BY OSTEOPOROSIS

ABSTRACT: In the Dominican Republic, osteoporosis is affecting many people. This disease attacks the structure of bone tissue causing a skeletal disorder characterized by loss of mass, wear and brittle fracture. In this study, the coxofemoral joints of women were analyzed because there is a relative movement between its elements forming tribological systems that work with precision and efficiency; but, friction, stress and wear in this area affect its mobility and resistance.

For this reason, through tribological methods, the tenacity to wear of the joints of 41 women was evaluated. As results, the rate and wear resistance to erosion and adhesion of the hip joints were obtained. Observing that the rate of adhesive wear in patients is greater than the erosive rate and as these rates increase over time, they reflect the conditions of osteopenia and osteoporosis as a consequence. Therefore, the resistance of the tissues decreases.
KEYWORDS: Wear toughness; wear rate; osteoporosis; osteopenia; coxofemoral joints.

1 I INTRODUCCIÓN

La osteoporosis afecta la estructura del tejido óseo causando un trastorno esquelético caracterizado por el desgaste y el deterioro de la arquitectura del tejido que produce por consiguiente un aumento de la fragilidad y la susceptibilidad a la fractura del hueso [1]. La fractura es la principal complicación, provocada por una baja resistencia ósea; esto implica el análisis de dicha resistencia debido a que es la fuerza necesaria para provocar, bajo ciertas condiciones de carga, la falla biomecánica del hueso [2]. Esta falla también es producto de las fuerzas que actúan sobre el hueso cuando se sobrepasa su capacidad de mantener el equilibrio [2]. La calidad ósea se refiere a factores como la arquitectura, la remodelación ósea, el daño acumulativo que crea microfisuras y el grado de mineralización [1].

La problemática presentada es de interés estudiarse porque afecta la forma en que se verifican fenómenos de fricción, desgaste y los esfuerzos que se provocan en las articulaciones de caderas y su efecto en la movilidad del sistema en su totalidad y resistencia [3], [4], [5]. Por ende, el propósito de esta investigación es determinar la tenacidad al desgaste de las articulaciones coxofemorales de pacientes afectadas por descalcificación de los huesos empleando métodos de la tribología para calcular la tasa y la resistencia al desgate que servirán para evaluar el comportamiento mecánico de estas articulaciones [5].

La Organización Mundial de la Salud convocó por primera vez a un grupo de expertos en 1994 para evaluar el riesgo de fracturas y su aplicación a la detección de la osteoporosis posmenopáusica. La osteoporosis se definió en función de la densidad mineral ósea utilizando una puntuación estandarizada, denominada T-score, para definir las categorías de diagnóstico, que son: Normal T-score ≥ –1; Osteopenia T-score entre –1 y –2.5; Osteoporosis T-score ≤ –2.5 y Osteoporosis severa T-score ≤ –2.5 con historial de fractura [6].

La osteoporosis es una enfermedad común que afecta a las poblaciones de personas en todo el mundo por lo que es gran interés estudiarse en la Republica Dominicana para conocer el daño tolerable o desgaste que produce en las articulaciones coxofemorales [7]. Por ende, en el estudio de las fallas por desgaste, es habitual considerar los procesos de desgaste definidos con referencia al tipo y geometría del movimiento relativo entre dos superficies en contacto [8].

Cada proceso de desgaste se debe a uno (o más) mecanismos de desgaste,

entre otros factores [9]. En este caso, se trataron el desgate por erosión y el desgate por deslizamiento [10], [11], [12]. En el caso de exista el desgate de rodadura por deslizamiento en las articulaciones coxofemorales, las dos superficies o partes del cuerpo, como cadera y fémur, estarán en contacto repetido [11]. Además, está presente el desgaste por erosión; el cual se produce cuando partículas sólidas o gotas de líquido impactan en las superficies, aunque otros parámetros dañinos pudieran presentarse [10]. El procedimiento de estos métodos tribológicos bajo normas se trata en la siguiente sección para cuantificar el daño en los tejidos óseos.

2 I MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales que se utilizaron en esta investigación son las imágenes y la data numérica obtenidas en el estudio por densitometría ósea en pacientes mujeres en el país. Asimismo, para hacer este estudio se empleó el sistema GE Lunar Prodigy Advance DXA manufacturado por GE Medical Systems LUNAR [13].

2.2 Metodología para el estudio tribológico

El estudio tribológico se realizó de acuerdo a la Norma ASTM G-137-97 para la evaluación del desgaste adhesivo por deslizamiento en la configuración Bloque sobre anillo (Block-on-ring) [11] y la Norma ASTM-G-76-02 en el caso del análisis del desgaste por erosión de partículas sólidas erosivas [10].

2.3 Metodología para el análisis de imágenes médicas por densitometría ósea (DXA)

Primero, se definió una población de 40 pacientes mujeres entre 42 y 75 años de edad, afectadas por descalcificación de los huesos. Luego, se llevó a cabo la prueba de densitometría ósea (DXA) en los centros de Diagnósticos y centros médicos en periodo de tiempo comprendido entre agosto 2011 hasta septiembre 2021. La cual consistió en el análisis cuantitativo de la articulación de cadera de cada paciente y de ahí se obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD) y el T-score y el Z-score y la imagen medica de la zona analizada.

El T-score y el Z-score expresan la severidad de la enfermedad en cada paciente; el T-score es el valor de la desviación estándar de la densidad mineral ósea con respecto a una persona sana de 30 años del mismo sexo, mientras que el Z-score es la desviación estándar de la densidad ósea de una persona con la de una persona promedio de la misma edad y sexo [6],[13], [14].

2.4 Métodos tribológicos para el estudio de desgate en las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

Debido a que en las articulaciones de cadera se presentan los mecanismos de desgaste por deslizamiento producto de los movimientos del paciente y/o el desgaste erosivo producto de la descalcificación de los huesos, se aplicaron los métodos tribológicos Bloque sobre Anillo (Block-on-Ring) regido por la norma ASTM 137-97 [11] [15], [16] y Erosión por Partículas Sólidas (Solid Particle Impingement) de la norma ASTM 76-02 [10], [15] para analizar los efectos de la descalcificación en dichos tejidos óseos. En el proceso de investigación; se inició con el cálculo de las variables tribológicas a partir de la data de masa del análisis de densitometría ósea, utilizando la ecuación 1.

$$M_{perdida} = \frac{\Delta BMC}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde ΔBMC es la variación del contenido mineral óseo y Δt el tiempo entre análisis de densitometría ósea.

Segundo, en el caso del estudio del desgaste adhesivo por deslizamiento presentado en las articulaciones coxofemorales, se utilizaron las ecuaciones del método Bloque en anillo, que consiste en presionar un bloque estacionario contra la superficie exterior de un anillo giratorio y el contacto puede darse cuando inicia la acción de deslizamientos entre los elementos en contacto, ya sea en ambiente de lubricación o de raspado, permitiendo altas presiones de contacto, tal como ocurre en las articulaciones coxofemorales [11]. Entonces, la tasa de desgaste adhesivo se determinó por la ecuación:

$$W = \frac{1}{F_N \cdot v \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

FN es la fuerza normal en el área de contacto ejercida por el acetábulo sobre la cabeza del fémur, v es la velocidad promedio de desplazamiento de la cabeza del fémur en la copa del acetábulo y lp es la densidad del mineral óseo y m la masa ósea.Luego, se determinó la resistencia al desgaste adhesivo:

$$R_{adhesivo} = \frac{1}{W_{adhesivo}} \quad (3)$$

El estudio de desgaste erosivo de las articulaciones de cadera se realizó de acuerdo al método de prueba de erosión que involucra una corriente de gas con partículas abrasivas que impactan la superficie («Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets» 2018) [10]. Entonces, la tasa de desgaste erosivo (Q) se obtuvo por la ecuación 4:

$$Q_{erosivo} = \frac{M_{perdida}}{t_{exp}} \quad (4)$$

Donde, texp es el tiempo de padecimiento. Luego, la resistencia a la erosión se determinó a través de la ecuación 5:

$$R_{erosivo} = \frac{1}{Q_{erosivo}} \quad (5)$$

Después, se analizaron los resultados y las condiciones médicas de osteoporosis, osteopenia y normal.

3 I RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis de densitometría ósea en las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificación de tejidos óseos

La data de densidad mineral ósea (g/cm2) obtenida por DXA en la cadera de mujeres de edades entre 42 y 75 años se presenta en la tabla 1. Se obtuvieron valores numéricos en el centro de la articulación de la cadera, diáfisis del fémur perpendicular al plano transversal con rotación interna de aproximadamente 15º a 25º, el cuello del fémur, la cabeza y el trocánter mayor.

Mujeres	NBMD	TBMD	TOBMD	t-sc	z-sc	NBMC	PESO (kg)	COND
P2BM	1.017	0.785	1.046	-0.2	1.7	4.90	63.50	Normal
P3CM	0.943	0.881	1.062	0.7	0.3	4.38	72.57	Normal
P4CR	0.874	0.89	1.052	-1.2	0.7	3.96	77.11	Osteopenia
P5CG	0.709	0.645	0.776	-2.4	-1	3.38	58.97	Osteopenia
P6DLO	0.804	0.896	0.982	-1.7	-1.1	4.56	77.11	Osteopenia
P7DLSM	0.949	0.778	1.021	-0.6	-0.1	3.82	63.05	Normal
P8DLM	1.002	0.726	1.004	-0.2	0.8	5.33	74.84	Normal
P9DD	0.862	0.649	0.87	-1.3	-0.2	3.36	72.57	Osteopenia
P10EA	0.823	0.665	0.833	-1.5	-0.2	4.36	72.57	Osteopenia
P11FI	0.829	0.661	0.861	-1.5	-0.6	3.45	63.50	Osteopenia
P12FC	1.145	0.784	1.096	0.8	1.7	4.70	64.86	Normal
P13FA	0.924	0.859	1.069	0.8	-0.2	4.31	72.57	Normal
P14GA	0.835	0.822	0.926	-1.5	-1.4	5.37	77.11	Osteopenia
P15GS	1.302	0.685	0.907	1.9	2.7	8.61	99.79	Normal
P16LRA	1.585	0.804	1.048	3.3	6.1	10.06	77.11	Normal
P17MM	1.098	0.844	1.067	0.4	0.8	4.54	72.57	Normal
P18PC	0.735	0.746	0.853	-2.2	-0.5	3.95	65.77	Osteopenia
P19PC	0.856	0.779	0.977	-1.3	-0.3	3.43	72.57	Osteopenia
P20SS	1.141	0.991	1.268	0.7	1.8	5.47	91.63	Normal
P21VL	1.678	0.674	0.964	4.5	5.3	14.69	58.97	Normal
P22ZR	0.695	0.619	0.726	-2.4	-0.7	3.19	63.05	Osteopenia

P23AL	0.845	0.744	0.912	-1.4	-0.6	3.71	75.75	Osteopenia
P24AY	0.899	0.743	0.964	-1	-0.1	4.23	90.72	Normal
P25AMY	1.241	1.065	1.363	1.5	2.9	7.48	73.48	Normal
P26AC	0.733	0.638	0.792	-2.2	-0.6	2.67	64.86	Osteopenia
P27AH	0.956	0.699	0.901	-0.6	0.2	4.75	58.97	Normal
P28AO	1.267	0.759	0.983	1.7	3.4	7.74	78.93	Normal
P29AL	0.913	0.749	0.913	-0.9	-0.3	4.36	92.53	Normal
P30AH	0.829	0.514	0.755	-1.5	0.4	3.58	57.61	Osteopenia
P31AH	0.725	0.514	0.687	-2.3	-0.4	2.54	57.61	Osteopenia
P32ADR	0.937	0.864	1.036	-0.7	0.6	4.62	72.57	Normal
P33AK	1.164	0.937	1.151	0.9	1	6.70	56.70	Normal
P34AK	0.619	0.504	0.627	-2.7	-1.4	2.02	97.52	Osteoporo
P35AK	0.612	0.483	0.64	-3.1	-1.5	1.50	97.52	Osteoporo
P36AJ	0.778	0.543	0.714	-1.9	-1.6	3.06	72.57	Osteopenia
P37AJ	0.708	0.506	0.673	-2.4	-2.1	2.41	72.57	Osteopenia
P38AAJ	1.101	0.82	1.099	0.5	1.5	6.18	72.57	Normal
P39AR	1.317	0.566	0.902	2	3.2	8.13	63.05	Normal
P40AS	1.092	0.892	1.102	0.4	0.4	6.05	63.50	Normal
P41ALS	0.943	0.833	1.04	-0.7	0.5	4.62	77.56	Normal

NBMD: Densidad mineral en el cuello femoral;TBMD: Densidad mineral en la región trocanterea; BMD: Densidad mineral en el triángulo de Ward; DBMD: Densidad mineral en la diáfisis; TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera;. t – sc: t-score; z – sc: z-score; ALT: altura. Medidas de densidad mineral en (g/cm2).

Tabla 1. Resultados del análisis de densitometría ósea en las articulaciones coxofemorales de mujeres que presentan descalcificación de los tejidos óseos.

Fuente: Elaboracion propia

El estudio del desgaste, se hizo en la región del cuello femoral, región trocantérea, Triángulo de Ward, la diáfisis y la región global de interés por considerarse que hay pérdida de masa ósea cuando las partes estén o no en contacto. Entonces, a partir de la densidad mineral óseo (g/cm2), el contenido mineral óseo (g), área proyectada (cm2), t-score y el z-score, se detectaron osteopenia, osteoporosis o desclasificación normal en las pacientes. Esta clasificación obedece a la puntuación estandarizada denominada T-score, para las categorías de diagnóstico, que establece: Normal T-score ≥ –1; Osteopenia T-score entre –1 y –2.5; Osteoporosis T-score ≤ –2.5 y Osteoporosis severa T-score ≤ –2.5 con historial de fractura [6], [17].

3.2 Resultados del análisis del desgate erosivo en las articulaciones de caderas de pacientes

La tabla 2 muestra los resultados del estudio del desgaste erosivo en la región del cuello femoral de pacientes con descalcificación ósea en condición normal, tales como la tasa de desgaste (Qerosivo), la resistencia al desgaste (Rerosivo) y el volumen perdido

(Vperd).

Pacientes	NBMC (g)	NBMC _0 (g)	NBMD_0 g/cm²	$Q_{erosivo}$ (g/año)	$R_{erosivo}$ (año/g)	Vol_{perd} (cm³)
P2BM	4.900	3.027	0.629	0.489	2.047	0.522
P3CM	4.380	3.345	0.737	0.281	3.562	0.788
P4CR	3.960	2.823	0.623	0.237	4.216	0.345
P5CG	3.380	3.227	0.677	0.076	13.107	0.038
P6DLO	4.560	4.464	0.786	0.015	67.418	-0.018
P7DLSM	3.820	3.182	0.790	0.124	8.091	0.116
P8DLM	5.330	3.887	0.732	0.271	3.691	0.374
P9DD	3.360	2.761	0.721	0.121	8.238	0.509
P12FC	4.700	3.261	0.757	0.498	2.006	-0.794
P13FA	4.310	3.564	0.780	0.152	6.587	0.661
P15GS	8.610	4.974	0.753	0.360	2.776	0.633
P16LRA	10.060	3.812	0.600	0.602	1.660	1.072
P17MM	4.540	3.684	0.819	0.091	11.038	-1.750
P20SS	5.470	3.551	0.741	0.288	3.475	0.397
P21VL	14.690	5.140	0.761	1.148	0.871	11.801
P24AY	4.231	3.549	0.743	0.378	2.648	-0.180
P25AMY	7.478	3.875	0.716	0.708	1.413	3.858
P27AH	4.750	3.696	0.758	0.107	9.348	0.722
P28AO	7.737	3.734	0.683	0.375	2.667	4.103
P29AL	4.361	3.734	0.778	0.100	9.952	0.027
P32ADR	4.621	3.390	0.699	0.466	2.146	0.726
P33AK	6.698	4.598	0.874	0.276	3.621	2.936
P38AAJ	6.179	3.818	0.740	0.443	2.256	2.843
P39AR	8.127	4.089	0.738	0.398	2.512	3.975
P40AS	6.049	4.486	0.874	0.291	3.442	2.404
P41ALS	4.621	3.444	0.710	0.121	8.269	0.544

Tabla 2. Valores del desgaste erosivo de las articulaciones coxofemorales-región del cuello femoral, de mujeres con descalcificación en condición normal.

El desgaste que se presenta en las articulaciones de caderas está asociado a la pérdida de masa ósea de la superficie de la cabeza del fémur que se une con la pelvis en el acetábulo. La descalcificación es producto de diferentes factores y el grado de la enfermedad indica la condición normal por la poca pérdida de masa ósea en comparación con la osteopenia y la osteoporosis [18], [19]. Estos resultados de desgate se muestran en la tabla 2 y en la tabla 3.

Paciente	NBMC (g)	NBMC_0 (g)	NBMD_0 g/ cm^2	$Q_{erosivo}$ (g/año)	$R_{erosivo}$ (año/g)	Vol_{perd} (cm^3)
P1BE	3.520	2.742	0.648	0.264	3.785	0.266
P10EA	4.360	3.628	0.686	0.244	4.105	0.252
P11FI	3.450	3.072	0.738	0.047	21.317	0.110
P14GA	5.370	4.543	0.837	0.056	17.928	5.385
P18PC	3.950	3.437	0.640	0.061	16.341	0.198
P19PC	3.430	3.334	0.728	0.021	47.703	-2.932
P22ZR	3.190	2.868	0.626	0.028	35.493	0.170
P23AL	3.711	3.547	0.759	0.017	58.825	-1.398
P26AC	2.672	2.900	0.649	-0.030	-33.751	-4.262
P30AH	3.582	2.878	0.620	0.183	5.466	-1.440
P37AJ	2.413	3.546	0.803	-0.116	-8.628	-5.503
P34AK	2.023	2.838	0.654	-0.116	-8.635	-5.742
P35AK	1.504	2.768	0.654	-0.180	-5.565	-9.513

Tabla 3. Valores de variables tribológicas que cuantifican el desgaste erosivo de las articulaciones coxofemorales de mujeres que padecen de osteopenia y osteoporosis.

En a tabla 3, las dos últimas filas de datos corresponden a las dos pacientes que padecen de osteoporosis, el resto de filas de datos corresponden a las pacientes con osteopenia. El efecto de la degradación de la masa ósea en el cuello del fémur que refleja estas enfermedades o patologías se puede observar en la Figura 1.
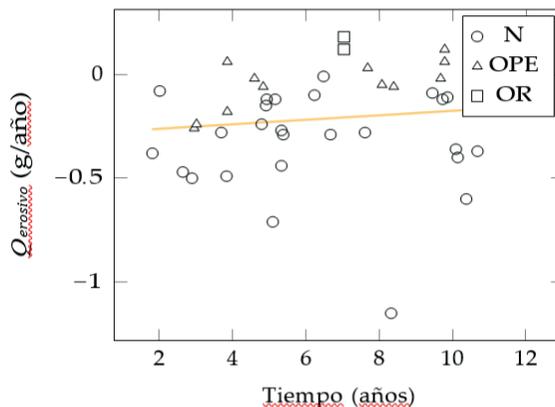
Figura 1. Tasa de desgaste erosivo (f (x) = 0.0108x – 0.2841; R2 = 0.0138) en pacientes: Condición N médica normal; OPE: Osteopenia; OR: Osteoporosis.

En la figura 1 se muestra la cuantificación del desgaste erosivo desde instante en que las pacientes comenzaron a perder masa ósea en la articulación de cadera hasta al grado de avance la condición patológica se ve reflejada por el volumen perdido y la tasa

de desgaste. En esta gráfica, se presenta la relación de la tasa de desgaste en función del tiempo transcurrido del deterioro de la superficie evaluada de acuerdo a los datos de z-score por densitometría [18]. La relación calculada posee un coeficiente de determinación de R2 = 0.0138, implicando un coeficiente de correlación de Pearson débil (r = 0.1174). Por lo tanto, se puede apreciar la pérdida gradual de material óseo en la interface de los componentes de articulaciones de caderas en contacto, que al pasar el tiempo avanza el fenómeno de desgaste [19], [20]. En consecuencia, se observa el desgaste poco pronunciado en las pacientes con inicio de la pérdida de masa en los tejidos. Luego, se ve con notable efecto el desgate de las pacientes que están en la condición de osteopenia y por otro lado, algunas pacientes tienen la tasa de desgaste erosiva mucho más alta; lo que indica la condición de osteoporosis.

En el estudio tribológico de las pacientes, es interesante estudiar más allá de la integridad de masa ósea en la articulación de cadera, la resistencia que presenta la zona del cuello del fémur y se puede ver en la figura 2. En la grafica se observa el modelo que relaciona la resistencia de las caderas con el tiempo en que ocurrió el desgaste. Este modelo tiene un coeficiente de R2 = 0.0065, que equivale a una correlación de Pearson de r = 0.0806, la cual es una correlación débil [21].
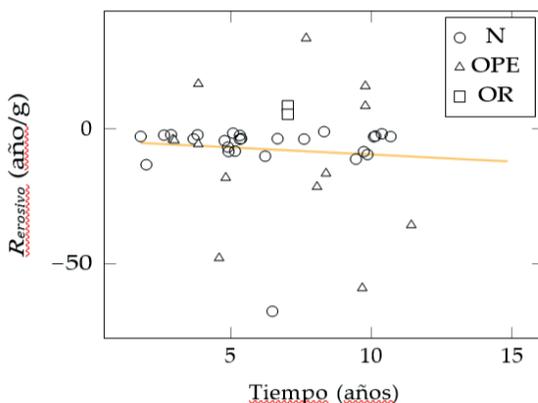
Figura 2. Resistencia al desgaste erosivo (f (x) = −0.5264x − 4.1205; R2 = 0.0065) en pacientes: Condición N médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

En la figura 2, se puede ver la resistencia que ofrecen los huesos de caderas ante la pérdida gradual de material óseo en las zonas evaluadas y se puede ver que al pasar el tiempo disminuye la resistencia y la integridad conforme avanza el desgaste por descalificación [20], [21].

A partir de los modelos matemáticos de regresión lineal determinados para la tasa de erosión y para la resistencia al desgate erosivo de la superficie del cuello del fémur

de cada paciente, se puede decir que el coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de las variables explicadas por la regresión. En el caso de este tipo de desgaste, el coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables que se han explicado en figura 1 y figura 2.

Al evaluar la resistencia de las caderas de las pacientes, se estudia el comportamiento probabilístico por medio de un modelo de distribución Gaussiana, el cual se muestra en la figura 3.
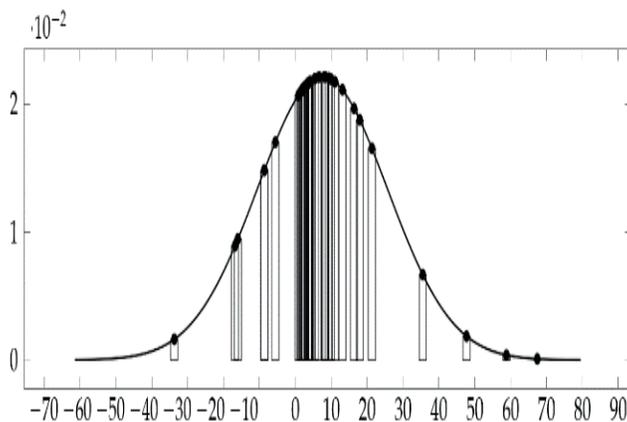
Figura 3. Distribución de la resistencia al desgaste erosivo en todos las pacientes en condición N médica normal de descacioficacion osea, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

La figura 3 muestra la distribución de la resistencia al desgaste erosivo en las pacientes en la diferente etapas progresiva de la descalcificación ósea, es decir, descalcificación en condición normal, osteopenia y osteoporosis; en detalle, tiene una media de 7.5269 (año/g), con coeficiente de asimetría relativamente de 1.4757 (> 1) implicando que existe una concentración de las pacientes con más resistencia hacia la parte derecha de la distribución y una curtosis de 4.08901 (> 3) indicando una distribución leptocúrtica, más apuntada y con extremos anchos que una distribución normal, que evalúa la condiciones de las pacientes ante la presencia de las enfermedades; por ende, esta problemática refleja una preocupación en la Republica Dominicana [20], [22], [23].

3.3 Resultados del Análisis del desgaste adhesivo por deslizamiento en las articulaciones coxofemorales

En el caso de la cuantificación del desgaste adhesivo estudiado en la zona de la cabeza del fémur, se tienen resultados del fenómeno de desgaste por efecto de la descalcificación y al mismo tiempo por la acción de deslizamiento en la zona de contacto de los elementos que componen las articulaciones de cadera de las pacientes [20], [21].

Las variables tribológicas correspondientes al desgaste adhesivo de las articulaciones

de caderas implican evaluar la región global de las articulaciones de cadera [21], por lo que se determinó la densidad del mineral ósea en la región global de la cadera tal como se muestra en tabla 4.

Paciente	t-score	z-score	**AG** (cm^2)	**TOBMC** (g)	**TOBMC_0** (g)	T OBMC*perd* (g)
P2BM	-0.90	1.70	33.80	33.56	25.12	-8.45
P3CM	2.00	0.30	33.02	33.31	31.93	-1.38
P4CR	-0.70	0.70	25.14	25.11	22.53	-2.59
P5CG	-0.70	-1.00	28.14	20.51	24.42	3.91
P6DLO	-0.70	-1.10	33.25	30.94	35.80	4.86
P7DLSM	-0.70	-0.10	25.93	25.11	25.46	0.34
P8DLM	-0.70	0.80	31.36	29.85	26.36	-3.49
P9DD	-0.70	-0.20	25.32	20.78	21.41	0.63
P12FC	0.80	1.70	28.43	29.62	22.91	-6.72
P13FA	0.80	-0.20	27.74	28.17	28.91	0.74
P15GS	1.90	2.70	39.11	33.52	18.84	-14.68
P16LRA	3.30	6.10	34.67	34.50	3.41	-31.09
P17MM	0.40	0.80	29.90	30.31	26.98	-3.32
P20SS	0.70	1.80	31.10	37.64	29.86	-7.78
P21VL	4.50	5.30	38.25	34.91	7.95	-26.96
P24AY	-1.00	-0.10	29.86	27.26	27.67	0.42
P25AMY	1.50	2.90	32.47	42.32	30.55	-11.77
P27AH	-0.60	0.20	30.28	25.77	24.97	-0.81
P28AO	1.70	3.40	32.68	30.43	14.10	-16.33
P29AL	-0.90	-0.30	29.97	25.86	26.98	1.12
P32ADR	-0.70	0.60	30.18	29.67	27.41	-2.26
P33AK	0.90	1.00	31.84	34.89	31.26	-3.63
P38AAJ	0.50	1.50	31.43	32.84	26.29	-6.55
P39AR	2.00	3.20	32.99	28.11	14.91	-13.20
P40AS	0.40	0.40	31.32	32.82	31.39	-1.43
P41ALS	-0.70	0.50	77.56	29.79	27.57	-0.08

TOBMC: Contenido mineral óseo en la región global de la cadera; TOBMD: Densidad mineral ósea en la región global de la cadera. Medidas de BMD en (g/cm2). Condición médica normal (t – score ≥ –1).

Tabla 4. Datos de densitometria de la region global de las aticulaciones de caderas de pacientes en condición médica normal de descacificacion.

La tabla 4 contiene los datos del contenido de mineral y densidad ósea, entre otros resultados obtenido del análisis de densitometría y a partir de los cuales se determinó el desgaste adhesivo por deslizamiento en la cabeza del fémur en relación al acetábulo en las

pacientes con condición médica normal en presencia de decalcificación de su masa ósea.

A partir de los métodos tribológicos para determinar el desgaste presente en las articulaciones de cadera, se calcularon los parámetros de desgaste, tales como la pérdida de contenido mineral óseo en la región global de la articulación de cadera (Mperd), la tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento (Wadh), la resistencia al desgaste adhesivo (Radh) y el esfuerzo producto de la fricción (σt), los cuales se presetnan en la tabla 5, [12], [21].

Paciente	t (z – s)	M_{perd} (g/año)	W_{adh} (cm²/N)	R_{adh} (N/cm²)	σ_t (Pa)
P2BM	3.834	-2.203	-4.46E-13	-2.24E+12	1.86E+05
P3CM	3.687	-0.374	-6.52E-14	-1.53E+13	1.64E+05
P4CR	4.793	-0.540	-8.95E-14	-1.12E+13	1.76E+05
P5CG	2.005	1.950	5.80E-13	1.73E+12	1.76E+05
P6DLO	6.475	0.751	1.34E-13	7.48E+12	1.76E+05
P7DLSM	5.158	0.067	1.40E-14	7.15E+13	1.76E+05
P8DLM	5.326	-0.655	-1.17E-13	-8.52E+12	1.76E+05
P9DD	4.934	0.128	2.75E-14	3.64E+13	1.76E+05
P12FC	2.887	-2.327	-4.40E-13	-2.27E+12	1.65E+05
P13FA	4.914	0.150	2.60E-14	3.84E+13	1.72E+05
P15GS	10.092	-1.454	-2.17E-13	-4.60E+12	1.91E+05
P16LRA	10.372	-2.997	-4.99E-13	-2.00E+12	1.75E+05
P17MM	9.452	-0.352	-6.11E-14	-1.64E+13	1.72E+05
P20SS	6.668	-1.167	-1.34E-13	-7.44E+12	1.86E+05
P21VL	8.318	-3.242	-7.69E-13	-1.30E+12	1.60E+05
P24AY	1.806	0.230	3.55E-14	2.82E+13	1.85E+05
P25AMY	5.090	-2.312	-3.08E-13	-3.24E+12	1.72E+05
P27AH	9.859	-0.082	-2.08E-14	-4.81E+13	1.60E+05
P28AO	10.680	-1.529	-2.66E-13	-3.76E+12	1.77E+05
P29AL	6.234	0.180	2.88E-14	3.47E+13	1.86E+05
P32ADR	2.639	-0.858	-1.53E-13	-6.52E+12	1.72E+05
P33AK	7.606	-0.477	-9.81E-14	-1.02E+13	1.58E+05
P38AAJ	5.326	-1.230	-2.07E-13	-4.83E+12	1.72E+05
P39AR	10.142	-1.301	-3.09E-13	-3.23E+12	1.64E+05
P40AS	5.380	-0.265	-5.10E-14	-1.96E+13	1.64E+05
P41ALS	9.726	-0.228	-3.80E-14	-2.63E+13	1.76E+05

Tabla 5. Datos de pérdida de masa, tasa de desgaste (Wadh), resistencia al desgaste adhesivo (Radh) y el esfuerzo a la fricción (σt) en la region global de las articulaciones de caderas condición normal.

En la tabla 5, se observa que las pacientes presentan descalcificación de los tejidos en diferencies grados. Las articulaciones de cadera presentan un desgaste adhesivo proporcionar en su variable de masa ósea con respecto a los datos de densitometría.

Las pacientes que presentan menos pérdida de masa tienen mayos resistencia físicas en sus tejidos, pero en todas las pacientes la cantidad de masa perdidas está dentro de un margen normal sin alcanzar el grado de la patología de osteopenia. En el caso de osteopenia y osteoporosis, la tabla 6 contiene los resultados del análisis de densitometría ósea.

Paciente	t-score	z-score	**AG** (cm^2)	**TOBMC** (g)	**TOBMC_0** (g)	T OBMC*perd* (g)
P1BE	-1.30	0.20	29.95	25.31	24.57	-0.75
P10EA	-1.50	-0.20	31.95	25.06	25.86	0.80
P11FI	-1.50	-0.60	25.90	21.03	23.19	2.16
P14GA	-1.50	-1.40	31.91	27.94	33.88	5.94
P18PC	-2.20	-0.50	30.11	24.21	26.09	1.88
P19PC	-1.30	-0.30	29.19	27.01	28.23	1.22
P22ZR	-2.40	-0.70	29.08	19.77	22.31	2.54
P23AL	-1.40	-0.60	29.45	25.38	27.73	2.35
P26AC	-2.20	-0.60	28.61	21.30	23.45	2.15
P30AH	-1.50	0.40	29.34	20.78	19.05	-1.73
P31AH	-2.30	-0.40	28.51	18.29	19.97	1.68
P36AJ	-1.90	-1.60	28.93	19.32	25.76	6.43
P37AJ	-2.40	-2.10	28.41	17.84	26.13	8.29
P34AK	-2.70	-1.42	28.09	16.37	22.25	5.87
P35AK	-3.10	-1.47	27.68	16.48	22.45	5.97

Tabla 6 Datos de densitometría de la región global de las articulaciones de caderas de pacientes con osteopenia y osteoporosis (últimos dos).

La Tabla 7 muestra los datos del esgaste adhesivo por deslizamiento en los pacientes que resultaron con pérdidas de contenido mineral óseo. Para el cálculo del desgaste adhesivo se consideró la carga se soporta la cabeza del fémur y la velocidad promedio de deslizamiento que experimenta una persona [24].

Paciente	t (z – s)	M_{perd} (g/año)	W_{adh} (cm²/N)	R_{adh} (N/cm²)	σ_t (Pa)
P10EA	3.006	0.266	5.96E-14	1.68E+13	1.72E+05
P11FI	8.067	0.268	6.63E-14	1.51E+13	1.64E+05
P14GA	14.834	0.401	7.58E-14	1.32E+13	1.75E+05
P18PC	8.389	0.224	5.42E-14	1.85E+13	1.66E+05
P19PC	4.587	0.265	5.05E-14	1.98E+13	1.72E+05
P22ZR	11.414	0.223	6.64E-14	1.51E+13	1.64E+05
P23AL	9.667	0.243	4.75E-14	2.10E+13	1.74E+05
P26AC	7.677	0.280	7.39E-14	1.35E+13	1.65E+05
P30AH	3.845	-0.449	-1.40E-13	-7.12E+12	1.59E+05
P31AH	3.845	0.436	1.51E-13	6.64E+12	1.59E+05
P36AJ	9.775	0.658	1.73E-13	5.77E+12	1.72E+05
P37AJ	9.775	0.848	2.38E-13	4.21E+12	1.72E+05
P34AK	7.035	0.835	1.88E-13	5.33E+12	1.90E+05
P35AK	7.035	0.849	1.87E-13	5.36E+12	1.90E+05

Tabla 7. Datos del desgaste adhesivo en pacientes mujeres con osteopenia y osteoporosis (ultimos dos).

En la figura 4 se presenta la tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento de todos las pacientes en función del tiempo expresado en un modelo de matemático [23]. En la gráfica se observa una relación con un coeficiente de determinación de R2 = 0.0045, lo cual indica que estas variables no están fuertemente correlacionadas.
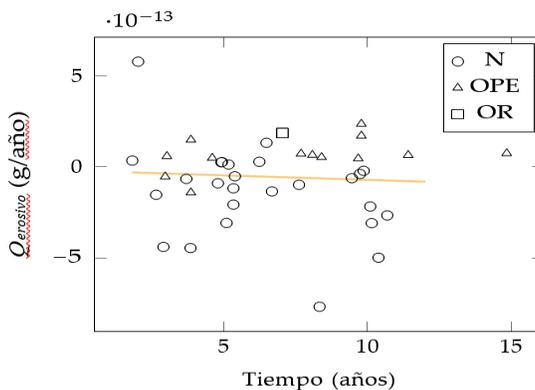
Figura 4. Tasa de desgaste adhesivo por deslizamiento (f (x) = –5 × 10–15x – 2 × 10–14; R2 = 0.0045). N: Condición médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

Las pacientes con determinada condición médica pueden mantener su estado de patología; la figura 4 indica que el tiempo es un factor influyente en el efecto de la enfermedad y el cambio de patología coforme se desgasta el tejido oseo, y se incrementa mientras

transcurre el tiempo por la accion conjunta de la descacioficacion y el deslizamiento de los elementos de las articulaciones de caderas [22].

El efecto del fenomeno del desgate adhesivo en las artculaciones de caderas se ha cuantificacado mediante la tasa de desgaste midiendo la catntidad de masa perdida [12], [13]. Sin embargo, la resistencia al desgaste es un indicador de la integridad física de la región global de las articulaciones. La resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento en función del tiempo de la enfermedad para todos los pacientes se muestra en la figura 5, se puede apreciar el modelo de ecuación que expresa una relación con un coeficiente de determinación es de R2 = 0.0127, indicando que las variables no están fuertemente correlacionadas.
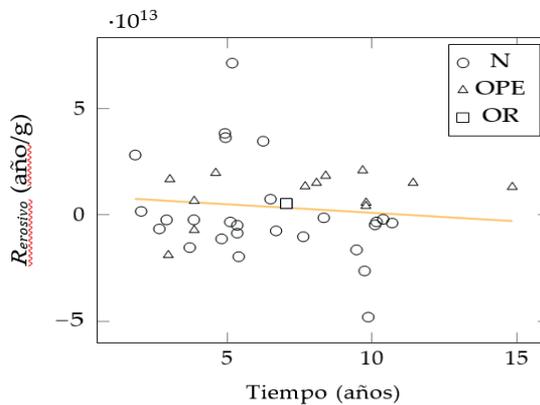
Figura 5. Resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento (f (x) = –8 × 1011x + 9 × 1012; R2 = 0.0127) en pacientes analizados. N: Condición médica normal, OPE: Osteopenia, OR: Osteoporosis.

A partir de los modelos matemáticos de regresión lineal determinados para la tasa de desgaste adhesivo y para la resistencia ante el desgaste adhesivo de la superficie del cuello del fémur de cada paciente, los cuales se muestran en las figuras 4 y 5, se puede decir que el coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de las variables explicadas por la regresión. Asimismo, el caso de este tipo de desgaste, el coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables que se han explicado (Figura 4 y Figura 5).

Por otro lado, la figura 6. muestra la distribución de la resistencia al desgaste adhesivo en todas las pacientes con una media de 3.79385E + 12 (N/cm2), un coeficiente de asimetría de 0.710122 (entre 1 y 1) indicando una distribución moderadamente inclinada hacia la derecha y una curtosis de 2.54094 (< 3) indicando una distribución platicúrtica, es decir, con un pico más bajo y amplio con extremos más cortos que una distribución simétrica [23].
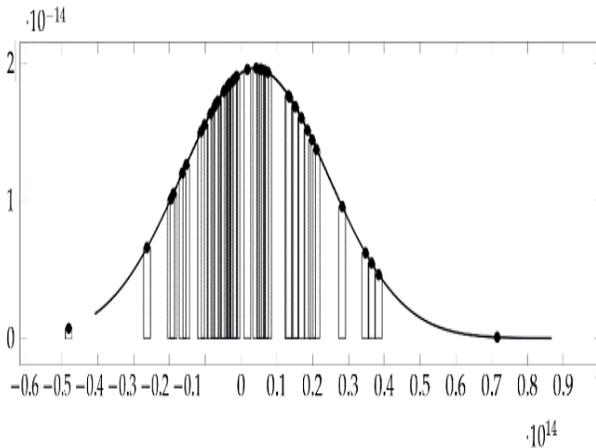
Figura 6. Distribución de probabilidad para la resistencia al desgaste adhesivo por deslizamiento en todos las paciente.

4 I CONCLUSIONES

Se evaluó la pérdida de masa ósea y el comportamiento mecánico de las articulaciones coxofemorales de pacientes mujeres afectadas por enfermedades con descalcificación de los huesos, en condición patológica de normal, osteopenia y osteoporosis empleando métodos de imágenes médicas y tribológicos.

Se utilizaron los resultados de densitometría ósea de articulaciones coxofemorales lado izquierdo correspondiente 41 pacientes mujeres. Las mujeres tienen desde 25 a 80 años de edad. Por ende, se obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD), el t-score y el z-score que se utilizaron para determinar la tasa y la resistencia al desgaste por erosión y desgate adhesivo en las articulaciones de cadera las mujeres.

Se analizó el desgaste de la zona del cuello del fémur izquierdo de las pacientes y se determinó una tasa que caracteriza la erosión por descalcificación en 1.14818g/año y tiene una distribución asimétrica con concentración moderada en el extremo izquierdo.

En el caso del análisis del desgaste adhesivo por deslizamiento, resultó una tasa de desgaste con un valor promedio de −5.38614 × 10−14 cm2/N, mostrando una relación directa que muestra el aumento el desgaste conforme pasa el tiempo de la enfermedad de las pacientes y presenta un modelo matemático con un coeficiente de correlación igual a 0.6639 con p − value = 0.009612(< 0.05), utilizando como referencia el tiempo basado en el z-score del paciente.

El coeficiente de determinación obtenido tanto para las tasas y resistencias al desgate erosivo como para las tasas y resistencias al desgaste adhesivo de las pacientes son la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión, en este caso ya sea la tasa o resistencia del desgate erosivo o del desgaste adhesivo de las pacientes.

Igualmente, el coeficiente refleja la bondad del ajuste de los modelos a las variables tribológicas.

La data del análisis de densitometría ósea es muy importante, puesto que evita un ensayo físico de desgaste y es un parámetro para calcular y evaluar los daños por erosión y adhesión de las articulaciones de caderas.

La tasa de desgaste adhesiva determinada cuantifica la transferencia de masa ósea de la superficie de la parte del fémur mientras se desliza haciendo contacto en el acetábulo en la articulación de las caderas de las pacientes que han adquirido osteopenia o ya sea osteoporosis, o que están en condición normal con la presencia de descalcificación de sus huesos cuando ellas caminan o ejercen movimiento, siendo esta tasa mayor en esta última condición patológica.

A partir de los estudios tribológicos realizados se puede decir que el desgaste en la región global de las caderas donde hace contacto la cabeza del fémur es mayor que en las superficies que no están en contacto como el cuello del fémur; por lo tanto, tasa de desgaste adhesivo es mayor la tasa de erosión en las articulaciones de caderas.

La descalcificación elimina gradualmente el material de la superficie de la articulación de cadera originándole grietas y ocasiona osteopenia hasta llegar a osteoporosis en muchos pacientes. El desgaste un indicador de la existencia de estas enfermedades por descalcificación y depende de varios factores, tales como la edad, alcoholismo, sobrepeso, menopausia entre otras causas.

Por último, del análisis estadístico se obtuvo una distribución asimétrica de resultados de la resistencia mostrando concentración en el extremo izquierdo de la curva para el desgaste erosivo y una distribución asimétrica con concentración en el extremo derecho para la resistencia al desgaste erosivo.

REFERENCIAS

[1] Ammann, P. y R. Rizzoli (mar. de 2003). «**Bone strength and its determinants**». En: Osteoporosis International 14, págs. 13-18. doi: 10.1007/s00198-002-1345-4

[2] González, Luis Alonso, Gloria María Vásquez y José Fernando Molina (mar. de 2009). «**Epidemiología de la osteoporosis**». En: Revista Colombiana de Reumatología 16, págs. 61-75. doi: 10.1016/s0121-8123(09)70119-7.

[3] Athanasiou, K. A. y col. (ago. de 2000). «**Fundamentals of biomechanics in tissue engineering of bone**». En: Tissue Engineering 6.4, págs. 361-381. issn: 1076-3279. doi: 10 . 1089 / 107632700418083.

[4] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). «**Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments**». *En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, pág. 012040. doi: 10.1088/1757- 899x/ 295/1/012040.*

[5] Cereatti, A. y col. (feb. de 2010). *«Is the human acetabulofemoral joint spherical?» En: The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume 92-B, págs. 311-314. doi:* 10.1302/ 0301-620x.92b2.22625.

[6] Caeiro Rey, J. R. y col. (ago. de 2005). «Factores determinantes de la resistencia ósea». En: Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas 14, págs. 67-74. doi: 10.1016/ S1132-8460(05)72686-6.

[7] Haba, Yvonne y col. (2012). «Relationship Between Mechanical Properties and Bone Mi- neral Density of Human Femoral Bone Retrieved from Patients with Osteoarthritis». En: The Open Orthopaedics Journal 6. url: https : / / dx . doi . org / 10 . 2174 % 5C % 2F1874325001206010458.

[8] Gant, A.J., M.G. Gee y B. Roebuck (ene. de 2005). «Rotating wheel abrasion of WC/Co hardmetals». En: Wear 258, págs. 178-188. doi: 10.1016/j.wear.2004.09.028. (Visitado 06-01-2021).

[9] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). *«***Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments***». En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, pág. 012040. doi:* 10.1088/1757- 899x/ 295/1/012040.

[10] **Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets»** (2018). En: ASTM. doi: 10.1520/g0076-18.

[11] **Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test»** (2017). En: ASTM. doi: 10.1520/g0077-17.

[12] **Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus***» (2017). En: ASTM. doi: 10.1520/ g0099.*

[13] Edith Miranda, V. y col. (ene. de 2013). «**Densitometría ósea». En: Revista Médica Clínica** Las Condes 24, págs. 169-173. doi: 10.1016/S0716-8640(13)70142-1.

[14] Sheu, Angela y Terry Diamond (s.f.). «**Diagnostic tests: Bone mineral density**: Testing for osteoporosis». En: Australian Prescriber 39, págs. 35-39. doi: 10.18773/austprescr. 2016.020.

[15] Menezes, Pradeep L y col. (2013). **Tribology for Scientists and Engineers**. New York, Ny Springer New York.

[16] Straffelini, Giovanni (2015). **Friction and Wear**. Springer International Publishing. doi: 10. 1007/978-3-319-05894-8.

[17] Liu, J. y col. (abr. de 2019). «**State of the art in osteoporosis risk assessment and treatment»**. En: Journal of Endocrinological Investigation 42, págs. 1149-1164. doi: 10.1007/s40618- 019-01041-6.

[18] Looker, A. C. y col. (ago. de 1998). «Updated Data on Proximal Femur Bone Mineral Levels of US Adults». En: Osteoporosis International 8, págs. 468-490. doi: 10 .1007 / s001980050093.

[19] Majumdar, S. y col. (dic. de 1994). *«***Analysis of trabecular bone structure in the distal radius using high-resolution MRI***».* En: European Radiology 4. doi: 10.1007/bf00226822. (Visitado 05-05-2021).

[20] Osterhoff, Georg y col. (jun. de 2016). «**Bone mechanical properties and changes with osteoporosis**». *En: Injury 47, S11-S20. doi: 10.1016/s0020-1383(16)47003-8.*

[21] Oungoulian, Sevan R. y col. (jul. de 2015). «**Wear and damage of articular cartilage with friction against orthopedic implant materials**». *En: Journal of Biomechanics 48, págs. 1957-1964. doi: 10.1016/j.jbiomech.2015.04.008.*

[22] Ring, David y Jesse B. Jupiter (dic. de 2004). «**Treatment of osteoporotic distal radius fractures**». *En: Osteoporosis International 16, S80-S84. doi: 10.1007/s00198-004-1808-x.*

[23] Mendenhall, William., Wackerly, **Dennos D. y Scheaffer, Richard L. (1994). Estadística** Matemática con Aplicaciones. México, 2da. ed., Grupo Editorial.

[24] Layton, Robin, Todd Stewart y Neil Messenger (2020). **Understanding Movement and its Influence on Tribology of the Human Hip**. url: https://etheses.whiterose.ac.uk/26885/ 1/Layton_Thesis_2020.pdf.

COMPARACIÓN DE MODELOS FÍSICOS EN LABORATORIO

Data de aceite: 03/04/2023

Víctor Manuel Ortiz Martínez
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Juan César Luna Bahena
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Jesús Gracia Sánchez
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

José Luis Herrera Alanís
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Eliseo Carrizosa Elizondo
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Javier Osnaya Romero
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Víctor Franco
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

RESUMEN: En el laboratorio de hidráulica fluvial del Instituto de Ingeniería, UNAM se realiza la modelación física de corrientes naturales y las obras hidráulicas que se emplazan, para estudiar el comportamiento y evolución de estas. El caso específico de este trabajo es la modelación del delta de un proyecto hidroeléctrico, en el cual se determinó las escalas de acuerdo al área disponible y la capacidad de bombeo. De acuerdo con las experiencias previas en otras modelaciones, requeríamos constatar que la pendiente calculada según las escalas, permitiría el transporte de sedimento, que es uno de los estudios objetivo de esta parte del trabajo. El modelo físico construido que se determinó sería un modelo distorsionado de fondo fijo.

PALABRAS CLAVE: Transporte de sedimentos, modelos físicos.

LABORATORY COMPARISON OF PHYSICAL MODELS

ABSTRACT: In fluvial hydraulics laboratory of the Institute of Engineering, UNAM physical modeling of natural streams and water works are located, to study the behavior and evolution of these is performed. The specific case of this paper is

modeling the delta of a hydroelectric project, which scales according to the area available and the pumping capacity was determined. According to previous experiences in other modeling, it was required to see that the slope calculated according to the scales, allow sediment transport, which is one of the objectives of this part of labor studies. The built physical model was determined would be a fixed background distorted model.
KEYWORKS: Sediment transport, physical models.

1 I INTRODUCCIÓN

Uno de los trabajos de investigación en el Instituto de Ingeniería, UNAM, requirió de la construcción de un modelo físico con escala distorsionada de 1:120 (horizontal) y 1:22.5 (vertical). Las experiencias previas, permiten trabajar con material de origen volcánico (el cual tiene un D_{50} de 0.2 mm), con distorsión vertical de 6. El nuevo modelo referente a una obra de fondo de un proyecto hidroeléctrico llevo a preguntarse si las condiciones de topo-batimetría permitirían la distorsión de 6 y/o debía determinarse otra. Esto fue motivo para realizar unas pruebas de transporte de sedimentos, principalmente, en un canal de pendiente variable (geometría b = 0.2 m y L = 5.0 m), con la finalidad de corroborar y/o determinar la distorsión del nuevo modelo a escala de la Hidroeléctrica.

La ingeniería hidráulica se ha apoyado en modelos físicos para el estudio cualitativo de los fenómenos hidráulicos que generalmente son adversos en los ríos, alterando su morfología y con ello la salud del mismo. Es por ello, que la hidráulica hace uso de los modelos físicos, pues con estos se logra hacer la revisión del funcionamiento hidráulico de las obras hidráulicas y sus perturbaciones. Lo que trae consigo beneficios, pues esto permite realizar modificaciones a las obras hidráulicas, lo cual en costo es menor que, si se realiza en prototipo. Este trabajo resume las experiencias de laboratorio para el caso particular del delta de un proyecto hidroeléctrico, en el cual es de interés la ubicación de la formación del hombro, así como la distribución de las partículas (sedimento). Para comprobar que el material utilizado como sedimento, se transportaría con la pendiente calculada de 2%, iniciamos una serie de pruebas en un canal de pendiente variable, lo cual se detalla en la sección siguiente.

2 I MODELO FÍSICO

Canal de Pendiente Variable

Como ya se describió brevemente, el proyecto final consistió en construir un modelo físico distorsionado con escala vertical de 1:22.5 y escala horizontal de 1:135 con distorsión de 6. Este modelo es utilizado para realizar las experiencias respecto a la ubicación del hombro (depósito de sedimento), para ello se determinó que el modelo seria distorsionado de fondo fijo, con un gasto máximo de 200 LPS.

Se diseñaron dos series de pruebas de laboratorio, la primera consistía en corroborar

la presencia de transporte de sedimentos con dos tipos de arenas una de origen volcánico y una segunda con arena basáltica (azul) con peso específico de 2350 kg/m³ y 2650 kg/m³, respectivamente. Con la arena de origen volcánico se realizaron experiencias con diferentes pendientes y un gasto constante de 5 LPS. Finalmente se determinó que, para apreciar mejor el fenómeno de transporte de sedimento, se requería de hacer un contraste de tonos en el material, por lo que se realizó una prueba más, en la cual se utilizó arena volcánica (color oscuro) y arena de playa (color claro). Se apreció mejor el movimiento del sedimento, pudiendo obtener una secuencia de imágenes del transporte (ver Figura 1 y 2)
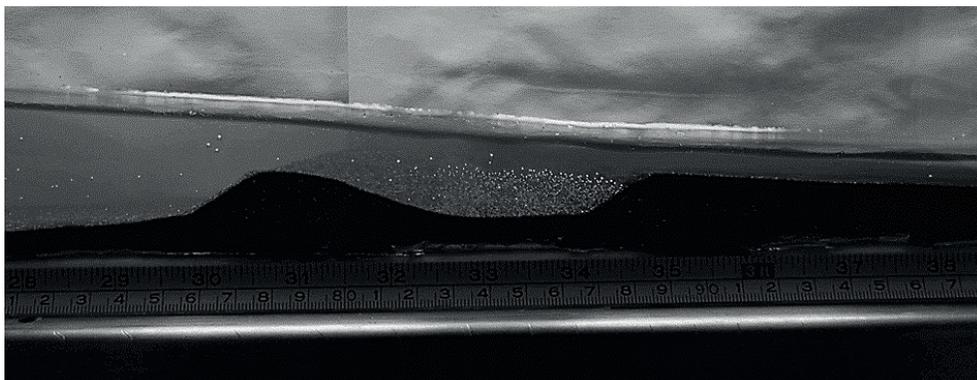
Figura 1.- Inicio de la formación del hombro (canal de pendiente variable)
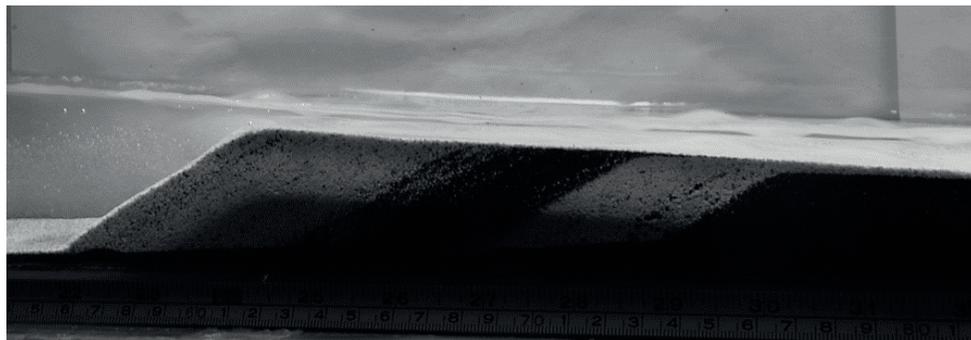
Figura 2.- Formación del hombro.

Estas experiencias en el laboratorio, permitió la comprobación de la pendiente calculada, utilizando la ecuación [1] de escalas de pendiente para modelos fluviales distorsionados (Maza 1969). En las pruebas para los materiales utilizados el sediento grueso se depositó en la misma región de formación del hombro. El cálculo de la pendiente para el delta es la siguiente:

$$S_e = \frac{H_e}{L_e} \qquad [1]$$

Sustituyendo datos:

$$S_e = \frac{22.5}{135} = 0.166$$

Finalmente se determina la pendiente del 2%

3 I MODELO FÍSICO DEL DELTA

La segunda serie de pruebas es operar el modelo del delta (Figura 3). Las experiencias son dos, pues son los materiales de arena negra (volcánica) y arena azul (basalto), para determinar en qué parte del delta se depositarán las partículas gruesas. Inicialmente se pensó en lavar la arena con la finalidad de observar cual era el comportamiento, pero se apreció que era necesario la presencia de finos, por lo que para ambos casos de arena se operó con las partículas traídas de las minas.

Para evitar la alteración de los hombros y depósitos de los diferentes diámetros de partículas se resolvió con la adecuación de una compuerta con válvulas que permitieron inhibir el incremento en la velocidad del flujo y con ello también mitigar los efectos de rasgamiento en los hombros. Mientras que en el sistema de derivación al modelo está pensado para poder cortar de manera súbita el paso de flujo y así poder descargar de manera paulatina el cauce del delta.
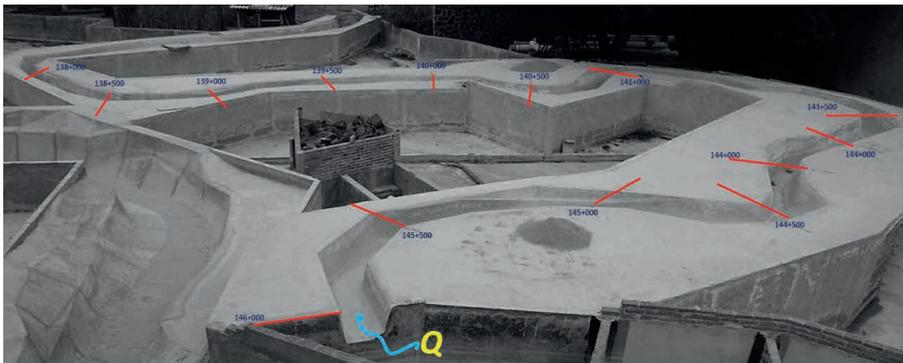
Figura 3 Modelo Físico del Delta de un Proyecto hidroeléctrico.

El caudal líquido en prototipo fue de 2180 m^3/s, en el caso de la arena negra, una hora de operación de avenida, mientras que el volumen solido equivale a 213,642.6 m^3, después de concluida la operación se observó la formación de dos hombros entre los cadenamientos; *hombro 1*: 140+700 a 140+500 y, *hombro 2*: 140+300 a 140+100. La figura 4, muestra gráficamente la ubicación de los hombros para estas condiciones. En general la retención de los sólidos se presentó en esta zona, lo que se puede observar en las curvas que acompañan esta figura.
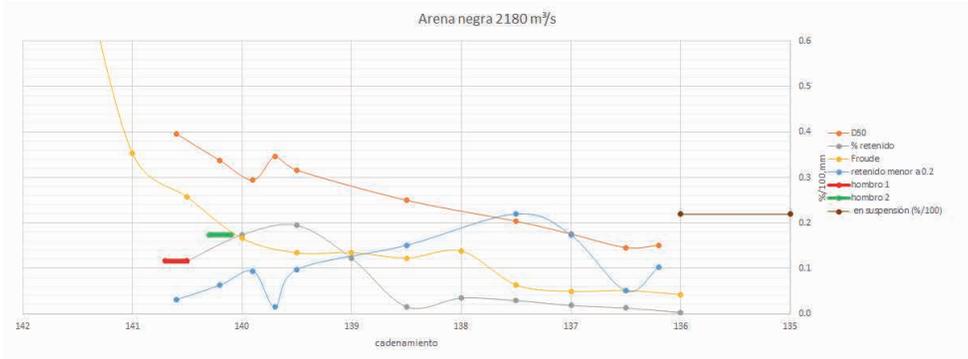
Figura 4 Formación de los hombros en el Delta (rojo y verde), arena negra.

Para el caso de la arena azul, el volumen solido es el mismo que en la anterior experiencia de 213,642.6 m^3. Mientras que el caudal en prototipo equivale a 2389 m^3/s. se observa la formación de dos hombros ubicados en el cadenamiento, hombro 1: 141+100 a 140+500 y, hombro 2: 140+400 a 140+000. Aunque se ubica 400 metros aguas arriba de las anteriores condiciones de material, se considera que el comportamiento de estos materiales no difiere de manera importante. En la figura 5 se observa la ubicación de los hombros, así como, las curas de retención de las partículas. En las Figura 6 (a y b) se observa la ubicación de los hombros, aunque aguas abajo del delta se depositaron finos, al realizar la extracción de muestras para cribarlas, se encontró que también se retuvieron finos en la zona de los hombros.
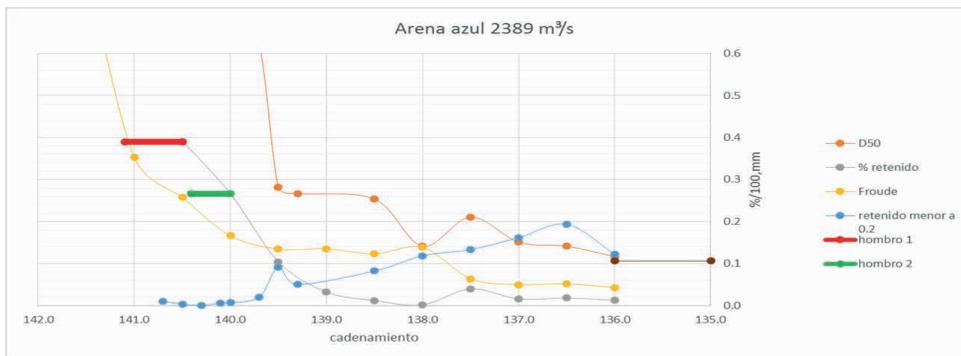
Figura 5 Formación de los hombros en el Delta (rojo y verde), arena azul.
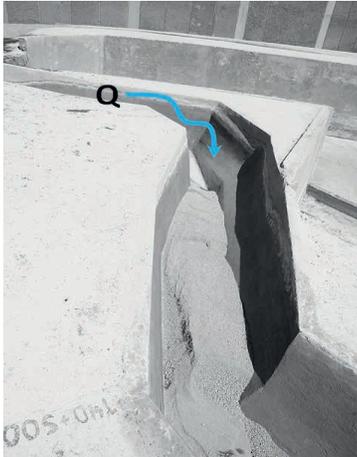
Figura 6a Hombro 1
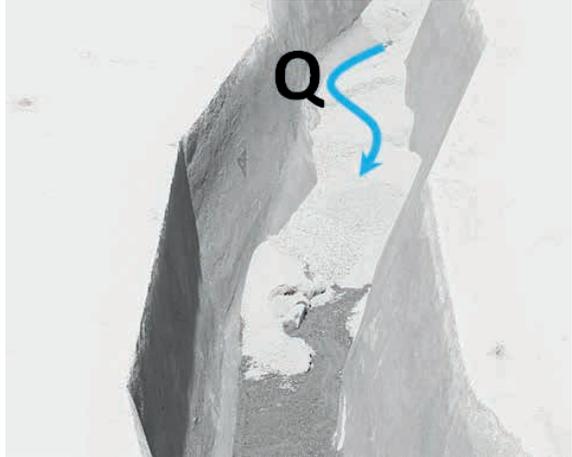
Figura 6b Hombro 2

4 I CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las experiencias desarrolladas en laboratorio permitieron conocer la ubicación de depósito de sedimentos gruesos, por ende, la formación de los hombros. Se pudo constatar que el tipo de material no tiene mayor influencia en el comportamiento del transporte, pues los depósitos fueran prácticamente en los mismos cadenamientos. Aunque se presentaron alteraciones de pequeños rasgamientos en los hombros, debidos al escurrimiento del agua que saturo las arenas, no fue significativo, por lo que se da por certeros los datos arrojados de las muestras tomadas en cada hombro y además de los finos depositados a lo largo del modelo físico del delta.

Basándose en los resultados obtenidos en el modelo físico, se puede aseverar que el azolve en la cortina puede ser resuelto con la operación de la obra de toma, es decir, pensar en una obra de fondo sería muy aventurado, por los costos de esta, además que los resultados de las muestras que se tomaron y cribaron sugieren que la cantidad importante para conservar la salud del cauce, son las partículas gruesas, y estas se quedan en la cola o delta del embalse.

REFERENCIAS

US bureau of Reclamation "Hydraulic Design Criteria", USA

Chow, V.T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hills Kogakusha, LTD, USA.

Maza, J. A. (1969). Modelos Fluviales, Instituto de Ingeniería, UNAM. México

Sotelo, A.S. (2008). Hidráulica General, LIMUSA, México.

Sotelo, A.S. (2002) Hidráulica de Canales, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia. “A.2.16. Sedimentación en embalses y desarenadores” CFE

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE NUEVA ESTACIÓN ELEVADORA DE AGUA DE LA ZONA SUR DE CÓRDOBA

Data de aceite: 03/04/2023

Teresa Reyna
Universidad Nacional de Córdoba, FCEFYN
Córdoba, Argentina
https://orcid.org/0000-0003-2114-0806

Santiago Reyna
Universidad Nacional de Córdoba. FCEFYN
Córdoba, Argentina

Fabián Fulginiti
Universidad Nacional de Córdoba. FCEFYN
Córdoba, Argentina

María Lábaque
Universidad Nacional de Córdoba, FCEFYN
Córdoba, Argentina

César Riha
CEAS S.A
Córdoba, Argentina

Tatiana Penza
Universidad Nacional de Córdoba, FCEFYN
Córdoba, Argentina

Maria Fernanda Funes
Universidad Nacional de Córdoba
FCEFYN

RESUMEN: Atento al marcado crecimiento inmobiliario que se encuentra actualmente en desarrollo en el sector sur de la ciudad de Córdoba, Argentina resulta imperiosa la construcción de una serie de obras a fin de mejorar la infraestructura de este sector de la ciudad para brindar un servicio de calidad a los nuevos habitantes. Dentro de la infraestructura mencionada se encuentra el servicio de agua potable que actualmente se encuentra concesionado pro la empresa aguas Cordobesas S.A. y quien dentro de la planificación ha incluido la construcción de una estación elevadora que brinde una caudal y presión adecuada para las nuevas urbanizaciones de la zona. Por este motivo en el año 2017 se comenzó junto con la empresa Aguas Cordobesas S.A. y las desarrollistas a proyectar una estación que brindará un suministro de agua potable en cantidad y calidad para los próximos 20 años. La estación planteada dispondrá una serie de ampliaciones a lo largo del tiempo llegando a un esquema de bombeo de (4+1) con una potencia instalada de aproximadamente 635 kw. La estación elevadora tomará agua proveniente de un acueducto de 1000mm que se desarrolla por calle Impira hasta la margen del arroyo La Cañada, incrementando la presión hasta

65 m.c.a. e impulsándolo por un nuevo acueducto a construir sobre el sector oeste de calle Impira que será el encargado de abastecer a las nuevas urbanizaciones.
PALABRAS CLAVE: Estación de bombeo, golpe de ariete, servicios públicos en Córdoba.

PROJETO DE UMA NOVA ESTAÇÃO DE ÁGUA ELEVADA NA ZONA SUL DE CÓRDOBA

ABSTRACT: Attentive to the marked real estate growth that is currently under development in the southern sector of the city of Córdoba, it is imperative to build a series of works in order to improve the infrastructure of this sector of the city to provide a quality service to the new population. Within the aforementioned infrastructure is the potable water service that is currently concessioned by the company Aguas Cordobesas S.A. and who within the planning has included the construction of a lift station that provides adequate flow and pressure for the new developments in the area. It is for this reason that in 2017 it was started together with the company Aguas Cordobesas S.A. and the developers to design a station that will provide a supply of potable water in quantity and quality for the next 20 years. The proposed station will have a series of expansions over time reaching a pumping scheme of (4 + 1) with an installed power of approximately 635 kw. The lift station will take water from a 1000mm aqueduct that runs through Impira Street to the La Cañada stream margin, increasing the pressure to 65 m. and to promote it for a new aqueduct to be built on the west sector of Impira Street, which will be responsible for supplying the new developments.
KEYWORDS: Pump station, water hammer, public services in Cordoba.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba es la capital de la Provincia de Córdoba, Argentina. Se encuentra situada en la Región Centro. Esta ciudad es la más poblada (1.565.112 INDEC 2022), después de Buenos Aires, y es un importante centro cultural, económico, educativo, financiero y de entretenimiento.

La zona sur de la ciudad concentra hoy 44 emprendimientos residenciales, lo que ha significado el desarrollo de más de 3.800 lotes y 1.000 departamentos. La oferta de viviendas se multiplicó en los últimos 20 años, lo que se refleja tanto en una expansión del ejido urbano, como en la cantidad y variedad de las urbanizaciones desarrolladas en la zona. Este desarrollo explosivo provoca el déficit de la estructura existente que requiere nuevas obras a fin de satisfacer esta nueva demanda.

Se presenta a continuación el diseño y cálculo de una nueva estación de bombeo para el suministro de agua potable a la zona suroeste de la ciudad (Figura 1). Se analizan el comportamiento hidráulico a régimen permanente y a régimen impermanente con los requerimientos de diseño que imponen los resultados de estos análisis.
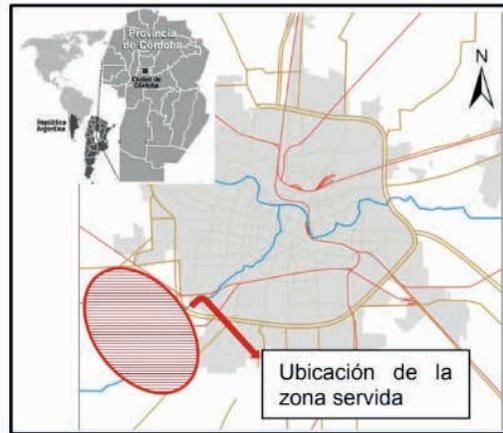
Figura 1. Zona de ubicación de nuevos emprendimientos en relación al ejido urbano

PLANTEO DEL PROBLEMA

Aguas Cordobesas es la empresa concesionaria del servicio de agua potable para la ciudad de Córdoba. El sistema de agua para la ciudad tiene como zona de abastecimiento a las cuencas altas de los ríos Suquía y Los Molinos. Estas cuencas se encuentran actualmente reguladas por los diques San Roque y Los Molinos respectivamente. Por medio de distintos canales y conductos de envergadura, el agua cruda es recolectada de esos embalses para ser volcadas en las Plantas Potabilizadoras Suquía y Los Molinos respectivamente, donde es realizado el proceso de potabilización. (ver figura 2).

Cada planta potabilizadora abastece de agua a un sector de la ciudad que recibe el nombre de sistema. El agua producida por la planta Suquía (sistema Suquía) alimenta la zona norte del río Suquía y el oeste de la Cañada con una capacidad de abastecimiento de 5 m3/s, mientras que la planta Los Molinos (Sistema Los Molinos) al sector sureste de la ciudad con una capacidad de abastecimiento de 2 m^3/s (Figura 3)
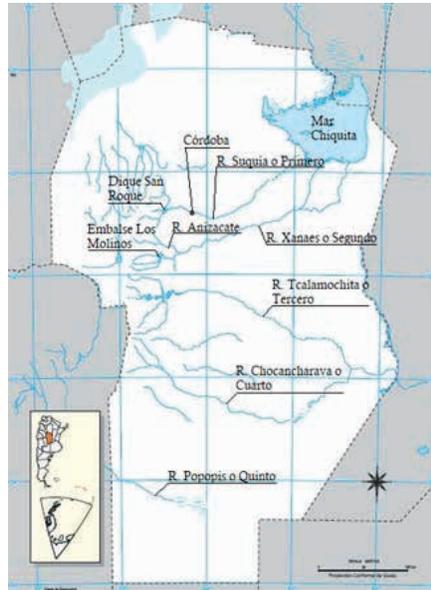
Figura 2. Ubicación del Dique San Roque y Los Molinos

Cada planta potabilizadora abastece de agua a un sector de la ciudad que recibe el nombre de sistema. El agua producida por la planta Suquía (sistema Suquía) alimenta la zona norte del río Suquía y el oeste de la Cañada con una capacidad de abastecimiento de 5 m^3/s, mientras que la planta Los Molinos (Sistema Los Molinos) al sector sureste de la ciudad con una capacidad de abastecimiento de 2 m^3/s (Figura 3)
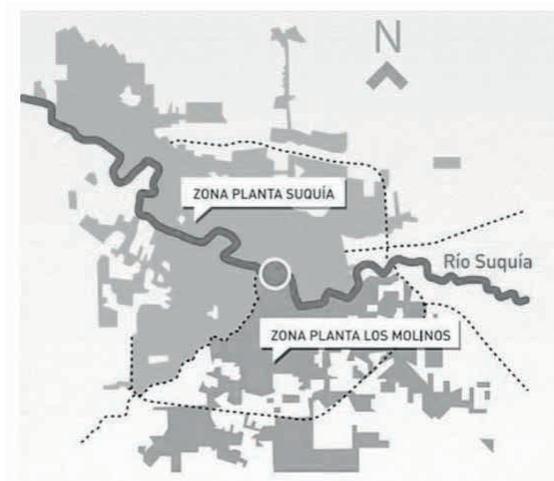
Figura 3. Sectores de la Ciudad de Córdoba servidos por las plantas potabilizadoras de Aguas Cordobesas (https://www.multimediolider.com.ar/)

El servicio prestado por la empresa para la zona sureste requiere disponer de obras adicionales (nueva estación de bombeo y acueducto) para satisfacer los nuevos desarrollos inmobiliarios planteados.

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

De acuerdo con las pautas de diseño se desarrollaron una serie de alternativas para la estación elevadora denominada por su ubicación Manantiales (EB Manantiales).

Primera alternativa: Se planteó una obra en una sola etapa donde el caudal mínimo resultaba de 200 m^3/h y el caudal máximo de 1000 m^3/h a una presión de 55 m.c.a. Para este esquema se calculó el equipo electromecánico, se diseñó el manifold de aspiración e impulsión con sus pérdidas de carga y esfuerzos en los distintos accesorios confeccionando un esquema de bombas de 3 +1, se efectuaron planos de plantas y corte de la estación elevadora.

Segunda alternativa: En esta nueva alternativa se planteó un sistema de 4 + 1 es decir 4 bombas de funcionamiento + 1 de reserva divididos en tres etapas. En una primera etapa se colocarían 2+1 (tres equipos) Esto es en base a lo planteado por Aguas de no tener sistemas de 1+1. Este equipo podría entregar en un comienzo los 200 m^3/h y como máximo estaría llegando a 750 m^3/h a 65 m.c.a. En la segunda etapa se adicionaría una nueva bomba quedando conformado un esquema 3+1 y finalmente en la tercera etapa se colocaría un equipo más completando el esquema 4 + 1 con una capacidad máxima de bombeo de 3000 m^3/h.

Estas alternativas exigían bombas de rango muy amplio y al problema de manejo de bajos caudales de arranque se sumaba la restricción debido a que la prestataria no aceptaba sistemas de 1+1. Se planteó entonces la opción de incorporar los caudales de una estación de bombeo ubicada físicamente cerca (estación Carrara) que debía ser repotenciada para dar solución a la demanda actual de otro subsector. Con esta opción sólo se necesitaba la nueva estación y se seguía trabajando con la Estación Carrara en las mismas condiciones.

De este análisis permitió establecer un esquema que permitiera trabajar con el mismo equipamiento. La alternativa planteada con esos condicionantes se desarrolla en el siguiente punto y fue la finalmente seleccionada.

ESQUEMA DE LA ESTACIÓN

La obra que se desarrolló y se encuentra en su etapa de finalización de obra, consiste en la construcción de una Nueva Estación Elevadora de Presión (EB Manantiales). La obra dispondrá de una aducción en diámetro 1000 mm y un conducto de impulsión de 900 mm. La estación dispondrá un caudal de diseño que se dividirá en tres etapas acompañando

el crecimiento de las urbanizaciones proyectadas en este sector de la ciudad de Córdoba (Tabla 1). En la etapa final se prevé un caudal pico de 3000 m^3/h.

Etapa	Q pico (m^3/h)	Qvalle (m^3/h)	Presión de salida – presión de entrada (m.c.a)
1° etapa	1500	400	65
2° etapa	2250	600	65
3° etapa	3000	800	65

Tabla 1. Condiciones de diseño

El sistema de bombeo se compone de cinco bombas (4+1) que se irán instalando en las 3 etapas según el siguiente esquema.

Primera etapa: Corresponde al comienzo de la operación de la EB donde se colocarían 3 electrobombas en un esquema (2+1) con estos equipos se garantizaría un caudal mínimo al comienzo de 400 m^3/h. El caudal máximo que podría entregar la estación al final de la primera etapa sería de 1500 m^3/h a 65 m.c.a.

Segunda etapa: Se colocará un nuevo equipo similar a los colocados en la primera etapa quedando la EB con un esquema de (3+1) pudiendo entregar la misma, un caudal máximo de 2250 m^3/h a 65 m.c.a. y un caudal mínimo de 600 m^3/h.

Tercera etapa: En esta instancia, se colocará un nuevo equipo similar a los colocados en las etapas anteriores quedando la EB con un esquema de (4+1) pudiendo entregar la misma, un caudal máximo de 3000 m^3/h a 65 m.c.a. y un caudal mínimo de 800 m^3/h en la siguiente imagen se puede observar la configuración de la estación elevadora con las tres etapas desarrolladas.

SELECCIÓN DEL EQUIPO ELECTROMECÁNICO

Luego de definidas las etapas de ejecución de la estación elevadora se procedió a efectuar la selección de equipo electromecánico, para lo cual se trató de que la selección permita colocar un solo tipo de equipo para todas las etapas de expansión de la estación elevadora, facilitando esto, el trabajo de mantenimiento futuro de la estación.

Por otra parte, y atento a la potencia importante del equipamiento se analizaron varias alternativas de distintas marcas comerciales, por otra parte, se verificó el valor del NPSH resultando el mismo para el punto de funcionamiento de 3,80 m, encontrándose la presión en el tramo de aspiración por encima a este valor descartándose por tal motivo el problema de cavitación en la máquina. Cada una de las máquinas dispone en su punto de funcionamiento una potencia de 159,24 kW disponiendo la estación de un tablero general donde para cada una de las máquinas se ha colocado un sistema de arranque suave a fin de reducir los consumos de corriente durante el arranque, repercutiendo esto directamente

en el dimensionado del generador de emergencia que dispone la EB.

El diseño de los conductos de admisión e impulsión se efectuaron considerando la premisa de mantener las velocidades dentro de rangos admisibles (en el orden de 1 m/s) a fin de reducir a un mínimo las pérdidas de carga. Respecto de los cambios de alineación se realizaron mediante curvas las cuales se efectuaron en una relación entre radio de curvatura y diámetro igual a 2, colaborando esto con la reducción de los coeficientes de pérdidas de carga de igual manera las convergencias y expansiones se proyectaron con ángulos inferiores a los 12°.

ANÁLISIS BAJO RÉGIMEN IMPERMANENTE

Una instalación hidráulica es un sistema dinámico y rara vez se halla en estado estacionario, ya que las condiciones de funcionamiento que determinan las variables hidráulicas varían en el tiempo con una mayor o menor rapidez. El análisis o los diseños adecuados de una instalación pasan por conocer la respuesta temporal de las variables hidráulicas de la instalación con el fin de evitar situaciones indeseables como: Presiones excesivamente altas o excesivamente bajas; Movimientos y vibraciones de las tuberías; Velocidades excesivamente bajas.

El comportamiento dinámico de la instalación, denominado transitorio, puede estar producido por diferentes causas que suelen además determinar la naturaleza del transitorio. Dichas causas pueden ser: una maniobra del operador, una mala selección de un componente, un acontecimiento externo a la instalación, problemas que se generan lentamente o de manera inadvertida, etc.

Sobre algunas de las causas anteriores el diseñador o el operador puede tener cierto control, como por ejemplo el arranque o parada de las turbomáquinas (bombas) y el cierre o apertura de las válvulas. Por el contrario, existen causas sobre las que no existe control alguno, tales como el corte del suministro eléctrico o la rotura de una tubería.

Para evaluar los efectos de un cierre brusco de válvulas con su consecuente exceso de presión en el acueducto y rotura, se ha implementado el cálculo de la sobrepresión producida por el fenómeno de golpe de ariete por la operación inadecuada de las válvulas que vinculan el nuevo acueducto que comienza desde la entrada de bombeo con diámetro 900 mm.

El primer tramo se desarrolla desde una distancia aproximada de 100m previo al ingreso a la EB. El segundo tramo va desde la EB hasta un nodo ubicado aproximadamente a 210m de la misma. Estas distancias se corresponden con puntos en que se colocarán los mecanismos de operación y cierre. La Figura 3 presenta los distintos elementos que integran el sistema simulado.

El primer tramo de conducto (C1) se ejecutará en PRFV hasta la curva denominada NODO 3, punto a partir del cual el material de la misma será ACERO (conducto C2). Hasta

el NODO 8 la conducción se mantendrá en ACERO (C3) y a partir del mismo continuará en PRFV.

El caudal de verificación corresponde al valor pico para el final del periodo de diseño indicado en el informe precedente cuyo valor es 3000 m^3/h. La presión de entrada en el Nodo inicial serán 10 mca, el mínimo estipulado de carga dentro del ejido urbano. La bomba deberá incrementar esta presión en 65 mca siendo la presión total aproximada a la salida de la estación de 75 mca.
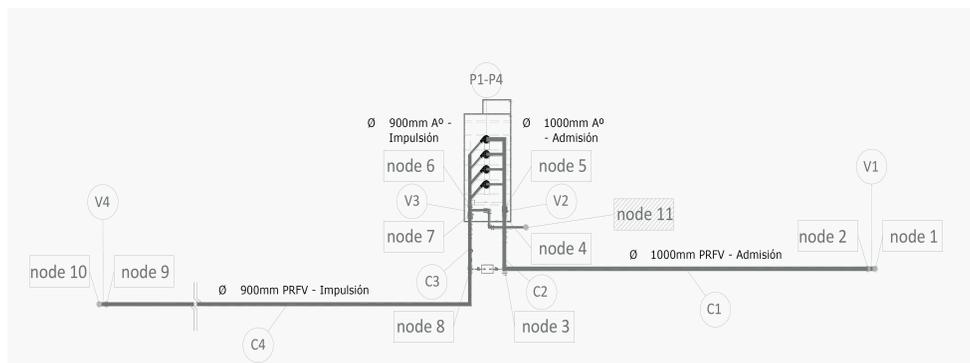
Figura 4. Tramos de conducción simulados bajo régimen impermanente

Donde se indican dos nudos de forma consecutiva (Ejemplo: NODO 4 - 5) es porque entre los mismos se ubicará un elemento de operación, de protección o de derivación.

La descripción de cada conducto se presenta a continuación

TRAMOS	LONG. (m)	H máx. (m)	Mat.	Diám. (mm)	Q (l/s)
C1: Nodo 2-Nodo 3	100	10	PRFV	1000	833
C2: Nodo 3-Nodo 4	34	10	Aº	1000	833
C3: Nodo 7-Nodo 8	34	75	Aº	900	833
C4: Nodo 8-Nodo 9	210	75	PRFV	900	833

Tabla 2. Descripción de cada conducto

RESOLUCIÓN CON MODELO COMPUTACIONAL: WHAMO

WHAMO (Water Hammer and Mass Oscillation) fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos para realizar simulaciones que ayuden a mitigar los efectos del golpe de ariete y flujo oscilatorio en redes que transportan fluidos como agua y combustible. El modelo consideró el caudal de operación de 3000 m^3/h (833 l/s). Las características elásticas e inerciales del grupo motor – bomba fueron estimados en base

a estaciones análogas del gráfico de Karman-Knapp (Knapp, 1937). En primera instancia no se incluyó ninguna válvula de alivio (VA) o anticipadora de onda (VAO). La máxima variación simulada se observó para un tiempo de cierre de 2 segundos en el NODO 9 (aproximadamente 210 m sobre el conducto de impulsión) previo a la válvula V4 donde la presión total alcanzó 139.96 mca (Figura 5).

CÁLCULO DE ESFUERZOS EN CAMBIO DE ALINEACIONES

Luego de analizados los distintos escenarios de funcionamiento bajo régimen permanente e impermanente, se contrastaron las presiones y velocidades desarrollados en los distintos tramos de las conducciones conjuntamente con la exigencia indicada en el pliego de especificaciones técnicas respecto de la presión de prueba de la tubería.
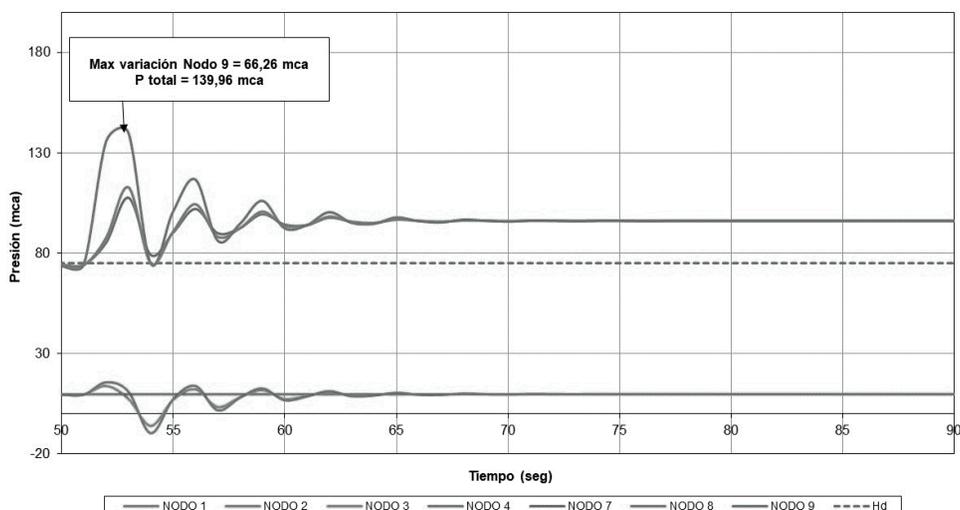
Figura 5. Diagrama de Presiones. Cierre de válvula V4, Tc=2 s - Q=833 l/s.

Luego de comparar todos los valores y teniendo en cuenta que para las velocidades desarrolladas dentro de las conducciones, el término de la ecuación del cálculo del esfuerzo debido a la velocidad resulta muy inferior respecto del término de las presiones, por tal motivo la condición más desfavorable para el cálculo de los esfuerzos en los cambios de alineaciones, cambios de diámetros y extremos de las conducciones resultó la presión estática de 10 kg/cm^2 que se encuentra especificado en el pliego de especificaciones técnicas.

Las ecuaciones utilizadas para la determinación de los esfuerzos según las dos direcciones resultaron.

$$F_x = (P * A + \rho * Q * V) * (1 - \cos\varphi)$$

$$F_y = (P * A + \rho * Q * V) * (sen\varphi)$$

Donde: Fx = Fuerza de equilibrio en la dirección X (N), Fy = Fuerza de equilibrio en la dirección Y (N), P = Presión interna (Pa), A = Área de la sección del conducto (m^2), φ= Ángulo de cambio de alineación de la cañería, ρ= Densidad del fluido, Q = Caudal en el interior de la cañería (m^3/s), V = Velocidad en el interior de la cañería (m/s).
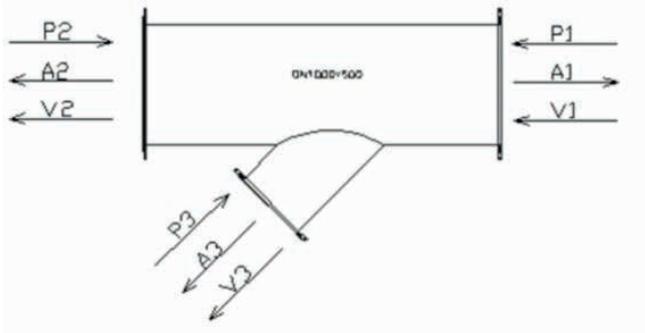
Figura 6.- Diagrama vectorial de cuerpo libre de accesorio tipo.
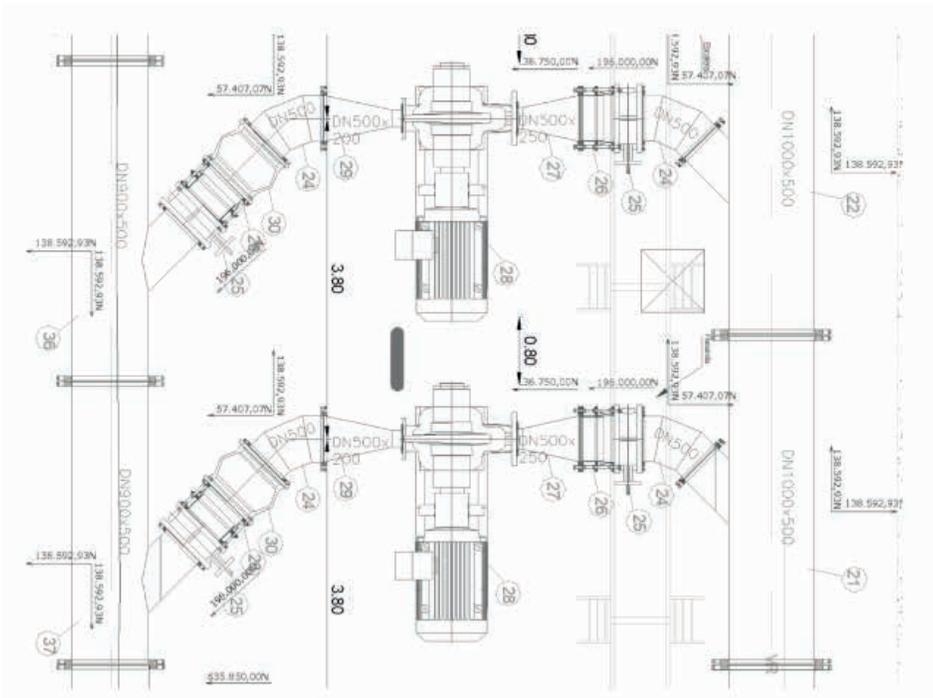
Figura 7.- Diagrama vectorial de esfuerzos en accesorios.

Con la determinación de los esfuerzos en cada accesorio de la estación elevadora se confeccionó un plano vectorial indicando el sentido e intensidad de las componentes de los esfuerzos y la resultante de los mismos. Dicho plano sirvió de base para el cálculo estructural de los anclajes de los accesorios, pudiéndose indicar en líneas generales que los esfuerzos fueron tomados a través de pilotes a flexión realizando la transferencia del esfuerzo de la tubería a la fundación mediante un cabezal superior de hormigón armado y las bridas de acero correspondiente para fijar los accesorios.

En la figura 7 se presentan un sector del plano vectorial de los esfuerzos determinados:

TRAZADO DEL PERFIL HIDRÁULICO

Con el caudal de diseño correspondiente a la etapa N°3 se determinaron las pérdidas de carga en los distintos tramos de tuberías y accesorios (válvulas, curvas, ramales, etc.). Para el cálculo de la pérdida de carga en los tramos rectos, se utilizó la expresión de Darcy Weisbach.

$$hf = \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} * f$$

Donde: hf= Pérdida de carga (m), L= Longitud de la tubería (m), D = Diámetro de la tubería (m), V = Velocidad del fluido dentro de la tubería (m/s) y, f = Factor de fricción

Para el caso de las pérdidas de accesorios se utilizó la siguiente expresión:

$$J = \xi * \frac{V^2}{2 * g}$$

Donde: V = Velocidad del fluido dentro de la tubería (m/s) y, ξ = Coeficiente de pérdida de acuerdo con el accesorio

Con los valores de las pérdidas obtenidas con las expresiones anteriores y a partir de la altura manométrica de ingreso a la estación se trazó el perfil hidráulico de la misma tal como se puede advertir en la siguiente imagen.
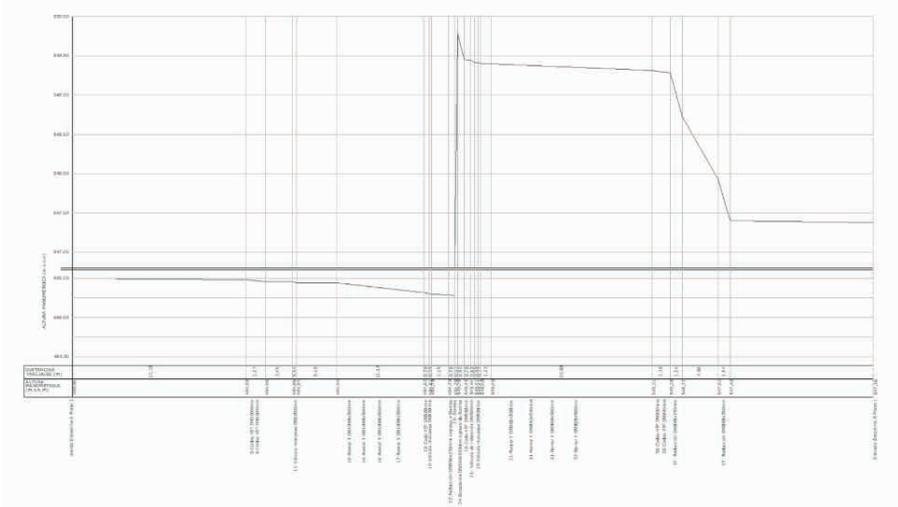
Figura 8.- Diagrama del perfil hidráulico a través de la estación elevadora.

VÁLVULA DE ALIVIO RÁPIDO (VAR)

Con el objeto de mantener las presiones dentro de niveles normales ante los distintos escenarios de funcionamiento, se colocó una VAR, la cual se setea para una sobre presión del 10% respecto de la presión en régimen permanente. Para el diseño y selección de esta válvula se realizaron las siguientes consideraciones para la etapa del montaje que garantizarán un correcto funcionamiento.

La válvula se coloca en derivación en TE, aguas abajo de la válvula de retención, disponiéndose aguas arriba de la misma de una válvula de aislamiento tipo mariposa.

Aguas arriba de la mencionada válvula de aislamiento y sobre la tubería y sobre el manifold principal de impulsión se coloca una cupla metálica de ½" sobre la cual se montará el manómetro para la lectura de la presión.

Para garantizar la correcta evacuación del agua a derivar, el tubo de descarga de la VAR se dimensionó el conducto de descarga garantizando que la velocidad en el interior no supere el valor de 4 m/seg durante la operación del equipo.

CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO

Con el objeto de disponer de un aforo preciso a la salida de la estación elevadora se instaló un caudalímetro electromagnético. Respecto del diseño de esta unidad y atento al escalonamiento que experimentará la estación elevadora a lo largo de su vida útil, se seleccionaron dos caudalímetros colocándose para la primera y segunda etapa un caudalímetro de 450 mm mientras que para la tercera etapa el caudalímetro será reemplazado por uno de 600 mm. Con este cambio de configuración se trató de disponer en todo momento de una lectura precisa para el caudal que se esté impulsando ya que en

este tipo de instrumental la precisión se encuentra directamente vinculada a la velocidad dentro del equipo.

VÁLVULA DE AIRE (VA)

Otro de los elementos de operación que se dispone en la EB resultan las VA, las cuales se colocarán en derivación tanto en su tramo de aspiración como de impulsión, resultando dichas unidades de triple efecto (aire, vacío y purga), las cuales se le ha adicionado el dispositivo arrestador de golpe de ariete que permite mitigar el fenómeno da golpe de ariete durante el régimen impermanente.

Para dimensionar estos dispositivos se tuvo en cuenta los cambios de presión y temperatura del fluido en la conducción, ya que son los que ocasionan la liberación del aire, con este valor se ingresó a la curva de descarga de aire de las válvulas y se seleccionó la que dispone del caudal acorde al requerimiento calculado. Por otra parte, se verificó también la condición de ingreso de aire a la tubería para este caso particular, ingresando en el gráfico correspondiente.

CONCLUSIONES

El marcado desarrollo de los barrios del sector sur de la ciudad de Córdoba generó la necesidad de nuevas obras de infraestructura para brindar un servicio de calidad a los nuevos habitantes. Dentro de la infraestructura mencionada se encuentra el servicio de agua potable que actualmente se encuentra concesionado pro la empresa aguas Cordobesas S.A. y quien, dentro de su planificación, ha incluido la construcción de una EB que brinde una caudal y presión adecuada para las nuevas urbanizaciones de la zona.

La estación planteada para solucionar el problema del crecimiento de la Ciudad, dispondrá de una serie de ampliaciones a lo largo del tiempo permitiendo adaptarse en etapas a este crecimiento y realizar las inversiones a medida que sean requeridas. El esquema final de bombeo planteado será de (4+1) con una potencia instalada de aproximadamente 635 kW.

La EB tomará agua proveniente de un acueducto de 1000 mm que se desarrolla por calle Impira hasta la margen del arroyo La Cañada, incrementando la presión hasta 65 m.c.a. y lo impulsará por un nuevo acueducto a construir sobre el sector oeste de calle Impira que será el encargado de abastecer a las nuevas urbanizaciones. El cálculo de la sobrepresión en la línea de conducción permitió definir la clase de los nuevos tramos de conducción y verificar la sobre resistencia de los conductos proyectados para las condiciones de operación. Con los valores obtenidos de la modelación del transitorio se observó que para los conductos de impulsión de clase 10 se estaría al límite de la clase del conducto incluyendo la sobre resistencia del 40%. Para alejarse del límite de resistencia,

se coloca una válvula anticipadora de onda (VAO) y se adopta un conducto de impulsión de clase 16 para el primer tramo de impulsión. Con los resultados de los cálculos en régimen permanente y transitorios se seleccionaron los elementos de operación del sistema necesarios para su correcta operación.

REFERENCIAS

Aguas Cordobesas. **Master Plan Manantiales II**, 2017.

Knapp, R. T. **Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behavior.** Transactions of the A.S.M.E. pp. 683-689, 1937.

https://www.multimediolider.com.ar/

INDEC (2022). **Estadística y censos**. https://www.indec.gob.ar/

US Army Corps of Engineers. **Water Hammer and Mass Oscillation (WHAMO) 3.0 User's Manual**, 1998.

CAPÍTULO 5

EDUCACIÓN Y CULTURA DEL AGUA EN LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Data de submissão: 18/02/2023 *Data de aceite: 03/04/2023*

Josefina Ortiz Medel
Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías
Guanajuato, Gto., México
https://orcid.org/0000-0003-2259-9643

María Lina Fuentes Galván
Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D.
Gerencia de Infraestructura
Dirección de Ingeniería
Monterrey, N.L., México
https://orcid.org/0000-0001-6795-3648

RESUMEN: En este trabajo se busca establecer la participación de la Universidad de Guanajuato en acciones educativas y de gestión relacionadas con la cultura del agua. Se analizaron las acciones e investigaciones realizadas bajo los atributos de cultura del agua, así como los planes de estudio; se aplicó un cuestionario a la comunidad universitaria para conocer su percepción sobre el agua. Se encuentra que en la UG se consideran las prácticas en el manejo del agua dentro de sus sedes. En los planes de estudio las áreas con mayor atención se enfocan en el ciclo del agua y la calidad, contaminación y tratamiento; en menor medida los temas relacionados con el cambio climático y su relación con el agua, el uso racional y sustentable del agua. Identificar áreas prioritarias de acuerdo con la situación estatal con respecto al agua, y la integración de estas en la UG, puede proporcionar la generación de competencias que aporten en la prevención, mitigación y solución de las problemáticas hídricas en el estado. La inclusión de temáticas relacionadas con el agua es relevante, considerando la situación de la región y la orientación de los programas educativos.

ABSTRACT: This work seeks to establish the participation of the University of Guanajuato in educational and management actions related to the culture of water. The actions and research carried out under the attributes of water culture were analyzed, as well as the study plans; a questionnaire was applied to the university community to find out their perception of water. It is found that the UG considers the practices in water management within its headquarters. In the study plans, the areas with the greatest attention focus on the water cycle and quality, pollution and treatment; to a lesser extent, issues related to climate change and its relationship with water, the rational

and sustainable use of water. Identifying priority areas according to the state situation with respect to water, and their integration in the UG, can provide the generation of competencies that contribute to the prevention, mitigation and solution of water problems in the state. The inclusion of topics related to water is relevant, considering the situation in the region and the orientation of educational programs.
KEYWORDS: Water culture, study programs, university management

INTRODUCCIÓN

En el estado de Guanajuato la principal fuente de abastecimiento es el agua subterránea (Comisión Nacional del Agua, 2022). De acuerdo con los usos a los que se destina, el 84% de los pozos activos corresponden a concesiones agrícolas, el 13% al uso público urbano y el 3% al uso industrial (Comisión Estatal del Agua CEA, 2018). Sin embargo, un factor relevante es que el 83% del abastecimiento público en el estado proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2022), lo que hace evidente la urgencia en la búsqueda de alternativas de abastecimiento, así como, en el uso y gestión sostenible del agua. Así mismo, Guanajuato es uno de los estados con mayor cantidad de acuíferos en estado de sobreexplotación.

En términos de vulnerabilidad hídrica Rivas (2016) identifica 4 zonas de la República con muy alta vulnerabilidad en función de tres componentes (grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación), una de estas zonas corresponde a la Región de El Bajío en donde se localizan diversos municipios del estado de Guanajuato. De acuerdo con Stevens (2012), en la vulnerabilidad hídrica influyen condiciones físicas y sociales que subyacen y subsisten a la problemática de sobreexplotación y sobreasignación del recurso hídrico.

De esta forma, considerando las características que hacen que el estado de Guanajuato presente serias problemáticas relacionadas con el agua ya sea por la escasez, los patrones de abastecimiento tradicionales, las actividades económicas, el aprovechamiento histórico y la contaminación en algunas zonas es relevante establecer estrategias que permitan actuar para gestionar y aprovechar el agua de forma sostenible con una visión ecosistémica y de responsabilidad social. Por tal motivo, el propósito de este trabajo es establecer la participación de la Universidad de Guanajuato como el principal centro educativo del estado, en acciones educativas y de gestión relacionadas con la cultura del agua, así como, establecer cómo se aborda el tema del agua en sus planes educativos.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una búsqueda de las acciones e investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Guanajuato para identificar aquellas establecidas bajo los atributos de la Cultura del Agua o relacionadas con la enseñanza hídrica.

Así mismo, se evaluó el contenido de las unidades de aprendizaje de la red curricular de los programas educativos de la UG, para identificar aquellas unidades de aprendizaje en las cuales se incorpora el tema de cultura del agua o aspectos relacionados.

Para identificar la percepción, conocimiento y manejo sobre el agua en la comunidad universitaria, compuesto por las acciones “Datos generales” para obtener la información característica de los participantes y su función en la UG (estudiantes, profesor, administrativo), el campus y programa educativo. Así mismo, una sección relacionada con el uso del agua, cultura del agua y formación en el ámbito universitario. Sobre la aplicación del cuestionario, este fue publicado en línea en la página web de la Universidad.

RESULTADOS

En cuanto a las acciones e investigaciones en torno a la Cultura del Agua se encuentra que en el estado de Guanajuato se han instalado 66 espacios de cultura del agua (ECAS). Los cuales corresponden a un lugar físico que brinda las condiciones para realizar actividades fijas o itinerantes de información y capacitación (CONAGUA, 2011). Dos de estos espacios se encuentran en sedes de la Universidad de Guanajuato, el primero se implementó en la División de Ciencias de la Vida en Irapuato y en noviembre de 2018 se inauguró el ECA del Colegio del Nivel Medio Superior en el municipio de León (CEA, 2019).

En tanto a la gestión institucional, la Universidad aborda aspectos relacionados con el uso apropiado y eficiente del agua, lo cual se articula con los elementos que forman parte de la Cultura del Agua. En el Acuerdo para la Emisión y Observancia de Acciones para la Gestión de la Sustentabilidad de la Universidad de Guanajuato (2017) se establecen acciones en el Capítulo II, enfocadas en las prácticas que lleven a una gestión y manejo sustentable del agua en las entidades académicas y administrativas de la Universidad.

Otro punto del Acuerdo que se alinea con la Cultura del Agua es el Artículo 17 “Comunicación para la sustentabilidad”. En este artículo se establecen acciones prioritarias, y particularmente la II, que establece el realizar campañas periódicas de difusión de información y de actividades en temas relacionados con las buenas prácticas ambientales, la sustentabilidad, el medio ambiente y responsabilidad social, con el propósito de fortalecer la sensibilización, el conocimiento, el compromiso, la apropiación y participación por parte de la comunidad universitaria.

En cuanto a los resultados concernientes a la identificación de unidades de aprendizaje, se evaluaron 174 planes educativos, de los cuales 2 corresponden a programas de bachillerato, 78 corresponden a programas de licenciatura, 42 a maestrías, 24 a planes de doctorado, 27 a especialidades y 1 a técnico superior. Se encuentra que en lo que se refiere a programas educativos, en el campus Guanajuato se imparten programas de licenciatura y posgrado enfocados en el Agua, en los que se considera la temática de la Cultura del Agua dentro de su plan académico y que cuentan con una unidad de

aprendizaje al respecto.

Se encuentran 26 unidades de aprendizaje que abordan temas relacionados con la Cultura del Agua, se imparten en tres de los campus de la Universidad (Guanajuato, Irapuato-Salamanca y León). El campus Guanajuato presenta el mayor número de unidades, pues como se mencionó tres programas educativos enfocados en el agua se imparten en este campus. En el campus Celaya-Salvatierra, no se encontraron unidades relacionadas con la cultura del agua, pero sí con el desarrollo sostenible y medio ambiente.

De los estudiantes que respondieron el cuestionario, el 70.1% ha cursado alguna materia o unidad de aprendizaje relacionada con el agua, se encuentra que los temas abordados en dichas materias, el ciclo del agua y la calidad, contaminación y tratamiento son los temas más estudiados, seguidos por el cambio climático y su relación con el agua, así como, el uso racional y sustentable del agua, se encuentran otros temas menor medida.

De los profesores que respondieron el cuestionario se encuentra que el 33.6% ha impartido alguna materia relacionada con el agua y el medio ambiente, cultura del agua o sobre el uso racional del agua. Asimismo, en un porcentaje similar (32.1%) se encuentran aquellos profesores que han desarrollado proyectos relacionados con los temas mencionados.

El 49.7% conoce alguna campaña de cultura del agua, y el 27% ha participado en algún proyecto vinculado con la cultura del agua, el cuidado y conservación del agua y el medio ambiente, de estos proyectos se encuentra que el 43.8% se desarrolló dentro de la Universidad, el 30% en la localidad o municipio, el resto no precisó en donde se desarrollaron las actividades. Sobre aquellos que han participado en algún proyecto vinculado con la cultura del agua o temas mencionados, el 95.4% manifiesta que experimentó un cambio con respecto a su apreciación hacia el agua y el ambiente a partir de su participación, este cambio se experimentó en acciones (80%), conocimientos (72.3%) actitudes (70.8%), valores (54.6%) y percepción (49.2%), otro (0.8%).

Con respecto a la disposición para participar en algún programa o proyecto sobre el cuidado y conservación del agua y el ambiente el 84.2% de los que respondieron el cuestionario manifiesta que participaría, además, el 90.9% considera que la implementación de un programa de cultura del agua entre la comunidad universitaria es muy importante, el 8.5% lo considera importante.

Los temas que la comunidad universitaria considera relevantes en el cuidado y conservación del agua son principalmente el uso racional y eficiente del agua con un porcentaje de respuestas mayor al 80%, le sigue la protección de ríos y cuerpos de agua, así como, la reutilización del agua y el tratamiento de aguas residuales y alternativas de abastecimiento en porcentajes mayores al 60%.

CONCLUSIONES

Se encuentra que en la Universidad de Guanajuato se considera a nivel institucional las prácticas en el manejo del agua dentro de las sedes de esta institución. Por otra parte, se identifica que los planes educativos, muestran que las áreas con mayor atención relacionadas con el agua e incluidas en las unidades de aprendizaje se enfocan en el ciclo del agua y la calidad, contaminación y tratamiento, en menor medida los temas relacionados con el cambio climático y su relación con el agua, así como, el uso racional y sustentable del agua. Se encuentran, tres programas educativos relacionados específicamente con el agua, en uno de los campus. Así como, un programa enfocado a la actividad de mayor demanda de agua en el mismo, la agricultura.

De esta forma, se identifican las áreas de mayor estudio relacionadas con el agua, sin embargo, los temas tratados no atienden específicamente a todos los problemas encontrados en el estado con respecto al agua, como lo es el déficit en la mayoría de sus acuíferos, abastecimiento de agua y alternativas, la eficiencia en el uso del agua, entre otros. Sin embargo, se identifica que uno de los temas con mayor atención en las unidades es la calidad, contaminación y tratamiento, lo que aporta a una de las situaciones identificadas en el estado.

La identificación de áreas prioritarias de acuerdo con la situación estatal con respecto al agua, y la integración de las mismas en la Universidad de Guanajuato, puede propiciar la generación de competencias que aporten en la prevención, mitigación y solución de las problemáticas hídricas en el estado. Por ello, la inclusión de temáticas relacionadas con el agua es relevante, considerando para ello la situación de la región y la orientación de los programas educativos.

REFERENCIAS

CEA. (2018). Pozos y Agua subterránea, consultado en: http://agua.guanajuato.gob.mx/disponibilidad_2.php#pozos

CEA. (2019). Consultado en línea en: http://agua.guanajuato.gob.mx/culturadelagua/diciva.php

CONAGUA. (2022). *Estadísticas del Agua en* México *2021*, Edición 2022. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2022.

CONAGUA. (2011). *Manual de Operación para el Programa de Cultura del Agua.* Recuperado en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/ManualdeOperaciondelProgramaCulturadelAgua.pdf

Stevens Vázquez, G. S. (2012). La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista de El Colegio de San Luis,* 0(4), [130-159]. doi:http://dx.doi.org/10.21696/rcsl042012530

Universidad de Guanajuato. (2017). *Acuerdo para la emisión y observancia de acciones para la gestión de la sustentabilidad de la Universidad de Guanajuato*. Rectoría General de La Universidad de Guanajuato, agosto 2017.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA ARTICULACIÓN DE CADERA AFECTADA POR DESCALCIFICACIÓN ÓSEA EMPLEANDO MÉTODOS FRACTALES

Data de aceite: 03/04/2023

Jose Luis Soto Trinidad
Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana
ORCID: 0000-0001-5343-0985

RESUMEN: Las articulaciones de cadera de los enfermos de osteopenia y osteoporosis muestran un comportamiento mecánico complejo producto de la descalcificación del tejido óseo, que modifica su estructura interna y sus propiedades. Las articulaciones se someten a esfuerzos porque junto con la musculatura que las rodean, soportan el peso del cuerpo en posturas estáticas y dinámicas a fatiga. Bajo condiciones de carga, la falla biomecánica de las articulaciones es el producto de las fuerzas que actúan cuando sobrepasen su capacidad de equilibrio mientras se desgastan. El comportamiento mecánico de las articulaciones es importante porque estas pertenecen al tronco y relacionan el hueso coxal con el fémur izquierdo o derecho durante las actividades de trabajo. Entonces, a través de métodos fractales se evaluaron los resultados de densitometría ósea. Por Trazas auto-similares en Box-Dimension y en Mass-Dimensión se determinó la dimensión fractal de las articulaciones para evaluar las irregularidades y desgaste de las misma. Asimismo, describe la variación de masa ósea en el tiempo que pasa de la condición normal hasta la osteoporosis.

PALABRAS CLAVE: Dimensión fractal, comportamiento fractal, desgaste, articulaciones de cadera, comportamiento mecánico y tejidos óseos.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE HIP JOINT AFFECTED BY BONE DECALCIFICATION USING FRACTAL METHODS

ABSTRACT: The hip joints of patients with osteopenia and osteoporosis show a complex mechanical behavior due to the decalcification of the bone tissue, which modifies its internal structure and its properties. The joints are subjected to stress because together with the muscles that surround them, they support the weight of the body in static and dynamic postures to fatigue. Under loading conditions, the biomechanical failure of joints is the product of forces that act when they exceed their

ability to balance while wearing. The mechanical behavior of the joints is important because they belong to the trunk and relate the coxal bone to the left or right femur during work activities. Then, through fractal methods, the results of bone densitometry were evaluated. Through self-similar traces in Box-Dimension and in Mass-Dimension, the fractal dimension of the joints was determined to evaluate their irregularities and wear. Likewise, it describes the variation of bone mass in the time that passes from the normal condition to osteoporosis.
KEYWORDS: Fractal dimension, fractal behavior, wear, hip joints, mechanical behavior and bone tissues.

1 I INTRODUCCIÓN

En el estudio del comportamiento mecánico de las articulaciones de cadera, es importante tomar en consideración los fundamentos de ciencias relacionadas con la geometría fractal, tales como la mecánica de la fractura y la mecánica de materiales. Por ende, la mecánica de materiales trata del estudio del comportamiento mecánico de los materiales bajo condiciones de carga. La mecánica de la fractura trata del análisis de las grietas u otras imperfecciones (poros, inclusiones, microgrietas), su efecto como elevadores de esfuerzo. Y se conoce como tenacidad a la fractura como la capacidad de carga límite que una estructura puede soportar antes de la falla [1].

Entre los procesos que llevan a las fallas se encuentra la acumulación de fatiga por las cargas a las que se ve expuesta una estructura o el sistema esquelético del cuerpo humano [2], [3]. El daño se ve en ocasiones concentrando en regiones de sistemas en las que existe movimiento relativo entre dos o más elementos formando sistemas tribológicos que de forma natural, trabajan con una alta precisión y eficiencia, dotando al cuerpo humano de una estructura articulada [4], [5], [6]; además, se ven afectadas por enfermedades como la osteoartritis, la osteoporosis y la artritis reumatoide que afectan la forma en que llevan a cabo los fenómenos de fricción y los esfuerzos que provoca en estas zonas; la lubricación y su efecto en la movilidad del sistema en su totalidad; y desgaste, la velocidad con que se produce, la resistencia que ofrecen los componentes al mismo y el daño consecuente que provoca en estos sistemas [6].

En el tejido óseo, el daño por fatiga, en forma de microfisuras, se ha relacionado con fenómenos como la adaptación a entornos de estrés alterados. Esto implica que el daño que se produce durante la carga fisiológica normal es lo suficientemente grave como para causar fallas si no se repara. Por tanto, la contribución de la fatiga a la fractura osteoporótica es compleja [4], [5]. Al estimular la remodelación ósea la fatiga promueve el deterioro visible de la microarquitectura del tejido cortical y trabecular1 que tiene su efecto muy significativo en las articulaciones de la cadera (Figura 1) [7].
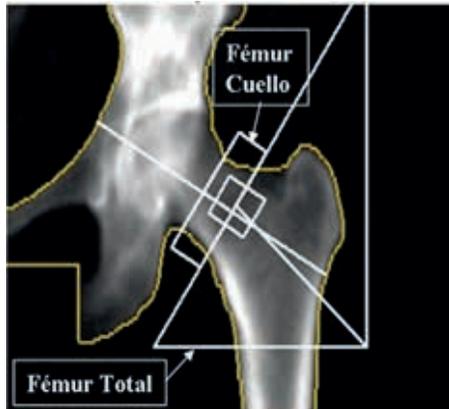
Figura 1. Análisis de masa ósea en el fémur izquierdo. Imagen de absorciometría con rayos X de doble energía en la cadera izquierda.

Fuente: Lorente Ramos y col., 2012.

Datos experimentales apoyan la hipótesis de que un factor importante en el estudio de la relación entre la fractura y la estructura geométrica de la superficie de propagación es la naturaleza fractal de las fracturas, es decir, características de autosimilitud de las superficies de agrietamientos a diferentes escalas de observación [8], análisis que provee los parámetros necesarios para la predicción de una futura propagación y por ende, las vías para evitarla o en su defecto estar preparado desde el momento que una persona comienza a presentar descalcificación de sus tejidos óseos hasta llegar al riego de osteoporosis severa [16].

Por lo tanto, el propósito de esta investigación es estudiar y evaluar el comportamiento mecánico de las articulaciones de cadera que presentan condiciones patológicas de descalcificación ósea empleando métodos de la geometría fractal, ya que por los métodos de imágenes médicas actuales son herramientas que permiten obtener resultados cualitativos y cuantitativos de la densidad de los tejidos, pero no son predictivos ni describen o generan la forma compleja del daño para estimar su magnitud. Además, los métodos tradicionales se basan en exponer los pacientes a los efectos radiológicos cada vez que se quiera monitorear la condición patológica y más aún estos métodos no permiten precisar la cantidad de calcio exacta a suplir que pueda fortalecer u homogenizar los tejidos afectados desde el punto de estudio de las matemáticas o desde los fundamentos de la Geometría Euclidiana [9].

Lo complejo radica en que la articulación coxofemoral es un tipo de articulación sinovial esferoide que conecta la cintura pélvica a la extremidad inferior. En esta articulación, la cabeza del fémur se articula con el acetábulo del hueso coxal. Por ende, el comportamiento mecánico de esta articulación es muy complejo porque es una articulación multiaxial que permite un amplio rango de movimientos: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación

externa, rotación interna y circunducción. Igualmente, esta articulación sacrifica movilidad por estabilidad y soporte de peso [5]. [6]. El peso total de la parte superior del cuerpo es transmitido a través de esta articulación a los miembros inferiores durante la bipedestación. Esta articulación es la más estable del cuerpo humano. En consecuencia, con la dimensión fractal de las superficies de desgaste de las articulaciones de cadera se cuantificará el grado de irregularidad y fragmentación de los tejidos óseos, y también describirá la variación de masa ósea a través del tiempo que pasa un paciente de la condición normal diagnosticado con descalcificación hasta adquirir osteopenia u osteoporosis.

2 I MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales se utilizaron en esta investigación son las imágenes y data numérica obtenidas en el estudio por densitometrías ósea en pacientes mujeres en el país. Asimilismo, para hacer este estudio, se empleó el sistema GE Lunar Prodigy Advance DXA manufacturado por GE Medical Systems LUNAR [13].

2.2 Metodología para el estudio

2.2.1 Metodología para el análisis de imágenes médicas por densitometría ósea (DXA)

Inicialmente, se definió una población de 40 pacientes mujeres entre 42 y 75 años de edad, afectadas por descalcificación de los huesos. Luego, se llevó a cabo la prueba de densitometría ósea (DXA) en los centros de Diagnósticos y centros médicos en periodo de tiempo comprendido entre agosto 2011 hasta septiembre 2021. La cual consistió en el análisis cuantitativo del tejido óseo de cada paciente en la articulación de cadera, y de ahí obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD) y el T-score y el Z-score y la imagen medica de la zona analizada.

El T-score y Z-score ofrecen expresan la severidad de la enfermedad en cada paciente, el T-score es el valor de la desviación estándar de la densidad mineral ósea con respecto a una persona sana de 30 años del mismo sexo, mientras que el Z-score es la desviación estándar de la densidad ósea de una persona con la de una persona promedio de la misma edad y sexo [10], [11], [12].

2.2.2 Metodos de la mecánica fractal para la evaluación de comportamiento mecánico las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

La metodología que se utilizó para evaluar las superficies afectadas de las articulaciones de cadera debido a la erosión por descalcificación ósea consistió en:

Primero, se trataron las imágenes médicas obtenidas por densitometría guardándolas en formatos de imágenes.

Segundo, se evaluaron las imágenes a través del software BENOIT. En un caso, se analizó la superficie visualizada en cada una de las imágenes empleando el método de Trazas auto similares por Box Dimension para obtener el tipo de fractal regido por un modelo de ecuación que describe el daño causado por la enfermedad y una dimensión fractal que cuantifica el grado de irregularidad. En el otro caso, se usó el método de Trazas auto similares por Mass Dimension y de manera similar se determinó el tipo de fractal y la dimensión fractal [9].

Tercero, Se obtuvo la gráfica de la parte afectada, en el caso de ambos métodos.

Cuarto, se interpretó el fractal encontrado y se determinó la dimensión fractal [9], [13], [14]. En el caso del análisis con el método BOX DIMENSION, la dimensión fractal (Db) está definida como el exponente de la proporcionalidad N(ϵ) α 1, siendo N(ϵ) el número de estructuras con auto-similitud de tamaño lineal ϵ requeridas para cubrir la estructura. En este caso considera que el espacio se divide en una cuadrícula de cajas con tamaño ϵ, y el número de cajas que contienen al fractal se determina de la forma Db = l´ım, ϵ→0

$$D_b = l\acute{\imath}m_{\epsilon \to 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}}. \quad (1)$$

Por otro lado, en el caso del método MASS DIMENSION, se define la dimensión fractal (Dm) a partir de la proporcionalidad m(r) α rDm , donde m(r) = M(r)/M es la masa contenido en cierto circulo de radio r, M(r) es el conjunto de puntos contenidos en el circulo y M es el total de punto en el conjunto.

3 I RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis de fractal de las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

En la tabla 1. se encuentran los resultados del análisis fractal obtenidos por medio del software BENOIT.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD Db	MASS DIMEN	SD Dm
P10EA	0.833	1.869	0.004	2.495	0.161
P24AY	0.964	1.884	0.006	1.949	0.012
P25AMY	1.363	1.839	0.011	2.611	0.208
P27AH	0.901	1.889	0.088	1.898	0.008
P28AO	0.983	1.874	0.005	1.886	0.004
P29AL	0.913	1.875	0.011	1.974	0.049
P32ADR	1.036	1.866	0.005	1.899	0.018
P33AK	1.151	1.857	0.004	2.552	0.331
P38AAJ	1.099	1.848	0.007	2.081	0.143
P39AR	0.902	1.875	0.005	1.874	0.003
P40AS	1.102	1.862	0.005	3.06283	0.844
P41ALS	1.04	1.845	0.009	1.91272	0.011

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD Db,: desviación estándar de Dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD Dm; desviación Dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 1. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de las articulaciones coxofemorales de pacientes con condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó la dimensión fractal de las articulaciones coxofemorales por ambas técnicas; BOX DIMENSION y MASS DIMENSION para todos los pacientes y cuyos valores se encuentran la tabla 1. Estas medidas representan la cuantificación de las asperezas de la superficie en la región global de las articulaciones de caderas de las mujeres que están presentando falta de carcio en sus tejidos óseos. Se observa que el daño acumulativo de las condiciones patológicas se comporta como un fractal.

Del análisis fractal, se deduce que los valores de la dimensión fractal obtenidos por Box dimension son menores con respecto a los obtenidos por MASS dimension. En sentido genérico con la primera técnica, la dimensión fractal es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de los huesos de las pacientes evaluadas mientras que con la segunda técnica se obtuvieron valores de la dimensión de las articulaciones en término de la masa perdida, variable física que caracteriza el desgaste originado por la descalcificación ósea [15], [16]. En consecuencias, las dimensiones fractales determinadas son proporcionales con los valores de densidad de mineral óseo de la región global de las articulaciones para fines de estimación del desgaste causado por la enfermedad [17], [18].

En el caso del análisis fractal del primer paciente P10EA, la Figura 2, muestra la

imagen médica obtenida del análisis de densitometría ósea en la articulación de cadera.
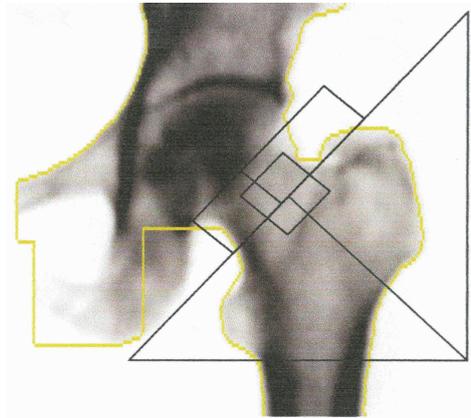
Figura 2. Imágen médica obtenida del análisis DXA del la articulacion de cadera del paciente P10EA. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Cortesia GRUMED. RD.

La Figura 3, se observa la imagen procesada por el método box dimension para determinar la determinar la dimensión fractal del fractal encontrado.
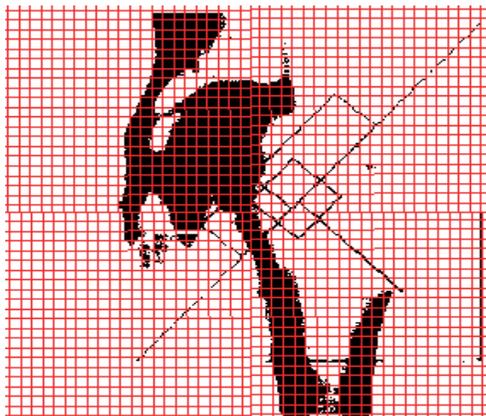
Figura 3. Imágen procesada de la articulacion de la paciente P10EA usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimension. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático con evolución logarítmica que describe el comportamiento fractal de la zona afecta de la articulacion de cadera de la paciente P10EA que se encuentra en estado de condicion normal en su padecimiento de descalcificación ósea se muestra en la figura 4.
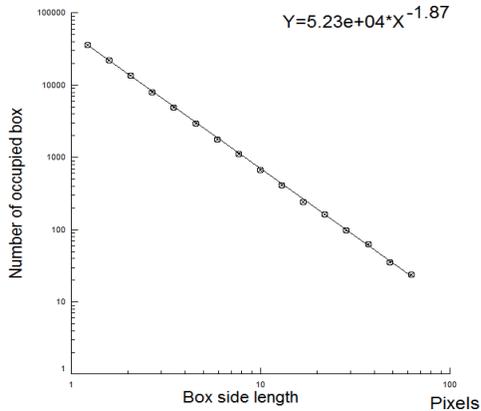
Figura 4. Modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P10EA en condicon normal usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimension.

Fuente: Elaboracion propia

El modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P10EA y su dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension es el de la ecuación 2.

$$Y = 5.23 \times ex-1.8695 \qquad (2)$$

El modelo matemático de la ecuación 2, es una ecuación logarítmica que describe el comportamiento mecánico de la articulación de cadera de la paciente P10EA y sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de sus tejidos óseos. Este modelo es un indicador del desgaste. Asimismo, por medio del método MASS Dimision, se obtuvo el modelo fractal de la ecuación 3.

$$Y = 0.262 \times ex2.49515 \qquad (3)$$

A partir del modelo matemático de la ecuación 3, se puede estudiar la pérdida de masa ósea, la cual tiene una desviación estándar respecto a su dimensión fractal de $Db = 1.8695$ siendo su dimensión fractal $Dm = 2.49515$. Esta ecuación indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial. Este comportamiento mecánico de la descalcificación de los tejidos en la articulación de cadera se muestra en la figura 5.
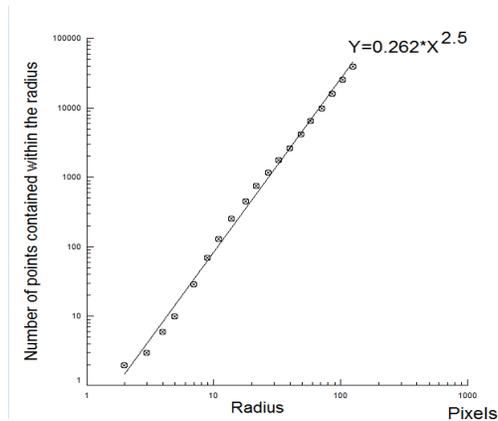
Figura 5. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P10EA en condición normal, usando el método fractal Mass dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

Fuente: Elaboración propia.

La grafica que muestra el comportamiento del modelo fractal obtenido por método Mass dimension se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 6

Figura 6. Imagen procesada de la articulación de la paciente P10EA usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la dimensión fractal Db es cercano a la media de 1.8686 ± 0.014258, con una desviación positiva de 0.000818 obtenidos a través del método Box dimension para la articulación de cadera de la paciente. Sin embargo, el valor de la dimensión fractal de la zona afectada Dm es superior a la media de 2.1227 ± 0.32880, con una desviación positiva de 0.37242 obtenida con el método Mass dimension para la misma articulación. El valor superior de ambas dimensiones fractal en la zona afectada indica que la paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo relativamente consistente, lo cual se corrobora con el

hecho de que al paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.823 g/cm2, superior al valor promedio de 0.7924 g/cm2 ± 0.0615 con una desviación positiva 0.0306, es decir, esto explica el comportamiento mecánico de la condición normal del proceso de descalcificación del tejido óseo. igualmente, el estudio fractal se aplicó a todas las pacientes que se enlistadas en la tabla 1.

En la tabla 2. se muestran los resultados del análisis fractal obtenidos en pacientes en condición de osteopenia.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD Db	MASS DIMEN	SD Dm
P23AL	0.912	1.883	0.003	2.458	0.277
P26AC	0.792	1.866	0.007	1.946	0.017
P30AH	0.755	1.862	0.013	1.987	0.049
P31AH	0.687	1.871	0.009	1.933	0.004
P36AJ	0.714	1.881	0.002	2.010	0.267
P37AJ	0.673	1.862	0.008	2.001	0.030

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD Db: desviación estándar de dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD Dm; desviación dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 2. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de articulaciones coxofemorales de pacientes con osteopenia.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que los datos de la tabla 2, se muestra la imagen médica del análisis de densitometría ósea de una paciente, la cual se muestra en la figura 7.
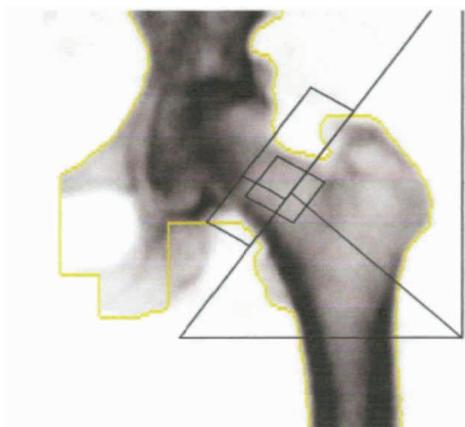
Figura 7. Imágen médica obtenida del análisis DXA del la articulacion de cadera del paciente P23AL con ostopenea.

Fuente: Cortesia GRUMED. RD.

Por otro lado, en la figura 8, se observa la imagen procesada por el método Box Dimension para determinar el fractal durante el análisis fractal de la imagen del paciente P23AL.
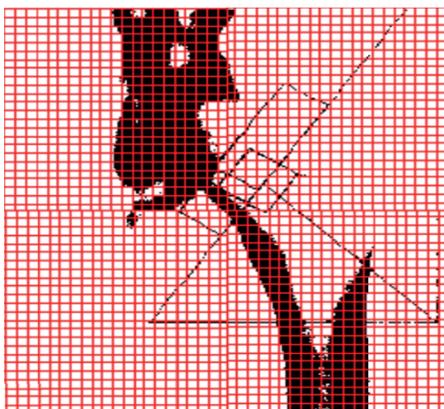
Figura 8. Imágen procesada de la articulacion de la paciente P23AL usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimension.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se obtuvo el modelo matemático con evolución logarítmica que representa el comportamiento fractal de los resultados médicos que indican la osteopenia de la paciente P23AL. Para el caso de la dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension este modelo es:

$$Y = 5.58 \times 10E04x{-}1.8830 \qquad (4)$$

Le ecuación 4 indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial a medida que ocurre la descalcificación de los tejidos en la articulación de cadera de la paciente P23AL, en condición de osteopenia, y se grafica en la figura 9.
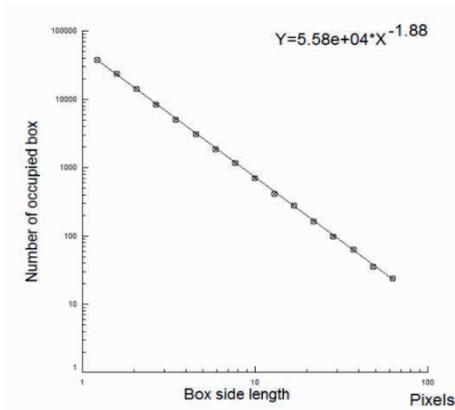
Figura 9. Modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P23AL con ostopenia usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimension.

Para el caso de la dimensión fractal obtenida por el método Mass Dimension a partir de los resultados de densitometría de la articulación de cadera de la paciente P23AL con ostopenia, el modelo matemático es el de la ecuación 5.

$$Y = 0.37 \times 10E04x2.4588 \qquad (5)$$

Este modelo fractal representa la pérdida de masa ósea tiene una dimensión fractal de Dm = 2.4588, se grafica en la figura 10.
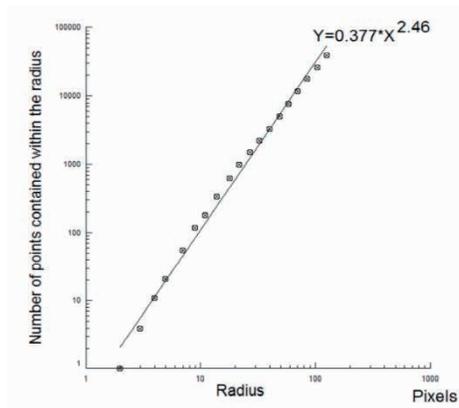
Figura 10. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P23AL usando el método fractal Mass dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

Fuente: Elaboración propia.

La grafica de la figura 10 que muestra el comportamiento del modelo fractal utilizado el método Mass dimension se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 11.
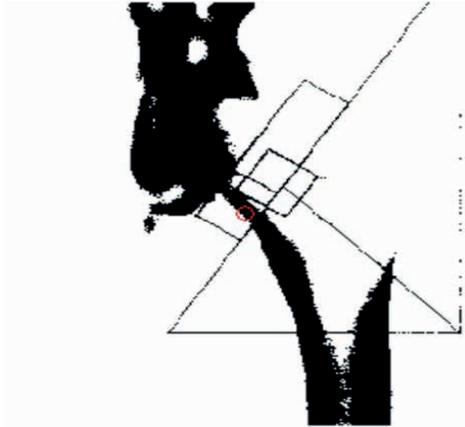
Figura 11. Imagen procesada de la articulación de la paciente P23AL con osteopenia usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión.

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la dimensión fractal Db es cercano a la media de 1.8686 ± 0.014258, con una desviación positiva de 0.0143. El valor de la dimensión fractal Dm es superior a la media de 2.1227 ± 0.32880, con una desviación positiva de 0.3361. El valor superior de ambas dimensiones fractal indica que el paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo consistente, lo cual se correlaciona con el hecho de que el paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.845 g/cm2 , superior al valor promedio de 0.7924 g/cm2 ±0.0615 para pacientes con osteopenia, como el caso de este, con una desviación positiva 0.0526.

Por otro lado, en la tabla 3. se encuentran los resultados del análisis fractal obtenidos por medio del software BENOIT en las pacientes con osteoporosis.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD Db	MASS DIMEN	SD Dm
P34AK	0.627	1.893	0.009	1.904	0.002
P35AK	0.64	1.873	0.008	2.049	0.119

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD Db,: desviación estándar de Dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD Dm; desviación Dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 3. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de las articulaciones coxofemorales de pacientes con osteoporosis.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 se muestra la imagen médica obtenida del análisis de densitometría ósea de la paciente con condición de osteoporosis.
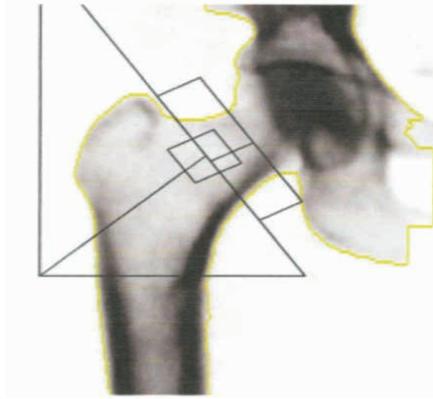
Figura 12. Imágen médica obtenida del análisis DXA del la articulacion de cadera del paciente P35AK con osteoporosis.

Fuente: Cortesia GRUMED. RD.

Luego, se procesó la imagen de la figura 12 por el método Box Dimension cuyos resultados se muestran en la figura 13.
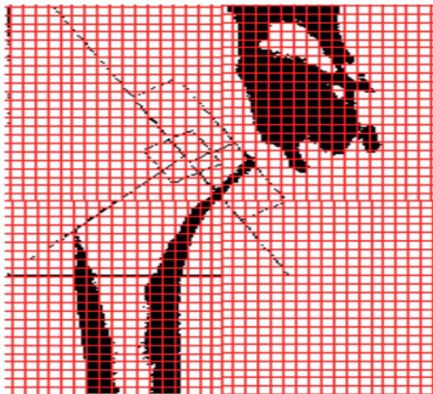
Figura 13. Imágen procesada de la articulacion de la paciente P23AL con osteoporosis usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimension.

Fuente: Elaboración propia.

La dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension, cuyo modelo matemático con evolución logarítmica del método de la enfermedad osteoporosis de la paciente P35AK es la ecuación 6.

$$Y = 6.24 \times 10E04x{-}1.8725 \qquad (6)$$

Esta ecuación indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial a medida que ocurre la descalcificación de los tejidos en la articulación de

cadera tal como se muestra en la figura 12.
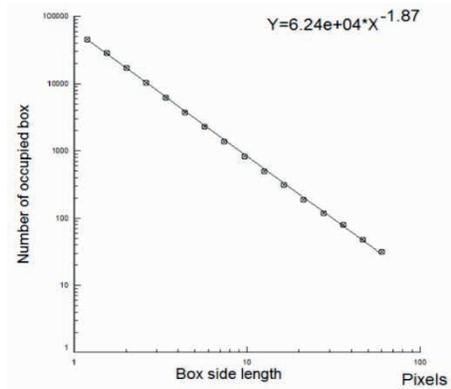
Figura 14. Modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P35AK osteoporosis, usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimension.

Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, para la paciente P35AK con osteoporosis, la dimensión fractal obtenida por el método Mass Dimension y el modelo matemático que representa el comportamiento fractal de la enfermedad es el de la ecuación 7.

Y = 2.2 × 10E04x2.04945 ……………(7)

Este modelo fractal que describe el comprotamiento de la osteorosis de la paciente P35AK muestra una evolución logarítmica de enfermedad y se muestra en la figura 15.
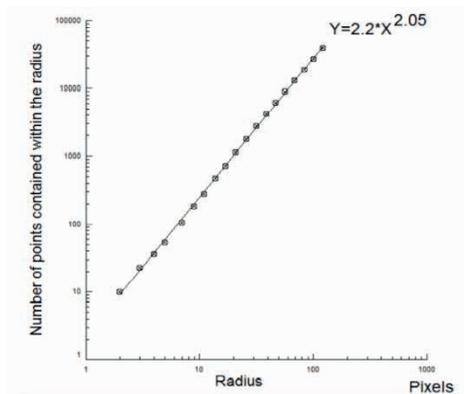
Figura 15. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P35AK usando el método fractal Mass Dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

La grafica (Figura 15) que muestra el comportamiento del modelo fractal utilizado el método Mass dimension en el análisis de la osteoporosis que presenta la paciente P35AK, se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 16.
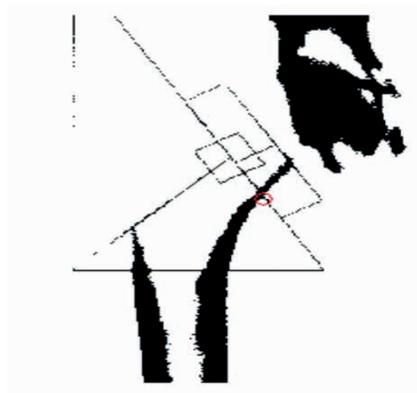
Figura 16. Imagen procesada de la articulación de la paciente P35AK osteoporosis, usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión.

El valor inferior de la dimensión fractal Dm indica que el paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo deteriorado, lo cual no se correlaciona con el hecho de que el paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.612 g/cm2 , inferior al valor promedio de 0.6155 g/cm2 ±0.6155 para pacientes con condición osteoporosis, con una desviación negativa de −0.0035.

Como se ve en la Tabla 3, para el método BOX DIMENSION, los valores de la dimensión fractal son más bajos para las personas sanas, mientras que para el método MASS DIMENSION, la dimensión fractal aumenta de forma proporcional al valor de la densidad mineral ósea.

Es importante tener imágenes médicas de buena calidad para el estudio; puesto que un menor contenido de calcio da como resultado una menor atenuación de los rayos X en el hueso, por lo que la película fotográfica se vuelve más oscura y se reduce el brillo de la imagen digital [19].

Si toma como referencia el valor de la dimensión fractal de un hueso de una persona sana, en este caso del paciente P40AS (TOBMD=1.102 g/cm2), cuya dimensión Db = 1.86195 es relativamente baja y Dm = 3.06283 es muy alta, porque su densidad de microarquitectura es muy alta.

Con los métodos de la geometría fractal de Box Dimension y Mass Dimension se determinó la dimensión fractal que caracteriza la rugosidad que se presenta en las articulaciones de caderas producto de la descalcificación de los tejidos óseos, de manera tal que al comportarse el efecto de pérdida de masa ósea como un fractal este explica las condiciones patológicas de osteopenia y osteoporosis [10], [16], [19].

4 I CONCLUSIONES

La geometría fractal se utilizó como herramienta útil para el análisis de imágenes y resultados de densitometría ósea. Se aplicaron los métodos de Box Dimension y Mass Dimension en la evaluación de las imágenes médicas para determinar la dimensión fractal y el coeficiente fractal. En este trabajo se puede ver que la estimación de la dimensión fractal se puede determinar mediante procedimientos de correlación de imágenes digitales, sobre la base de imágenes de tomografía computarizada y a pequeña escala, de tal manera que, las tomografías de hueso cortical muestran grandes diferencias en la distribución de densidad. Estos cambios pueden ser representados adecuadamente por la dimensión fractal.

El método Mass Dimension muestra una correlación más significativa, con coeficiente de Pearson > 0.50 en casi todos los casos de los valores de masas de los pacientes con respecto al método Box Dimension, el cual también es una buena técnica para el análisis y discusión de resultados. Por lo tanto, la microestructura ósea a diferentes escalas se puede representar mediante un conjunto estadístico auto-similar en tres dimensiones (escala de grises X – Y) que codifica la dimensión fractal. A la sazón, la dimensión fractal representa las propiedades geométricas de este conjunto auto-similar; por tanto, las irregularidades en la distribución de la densidad y las principales características geométricas de la microestructura ósea pueden representarse adecuadamente mediante este parámetro.

Se pueden hacer estimaciones en base a los resultados de los fractales y dimensión fractal obtenidos a partir de los método de la geometría fractal empleados en esta investigación; puesto que se evaluó la pérdida de masa ósea y el comportamiento mecánico de las articulaciones coxofemorales de pacientes mujeres afectadas por enfermedades con descalcificación de los huesos, y de aquí, los valores de la dimensión fractal se utilizaron para evaluar el comportamiento mecánico de estas articulaciones de caderas en las condiciones patológicas de normal, osteopenia y osteoporosis. Encontrándose que la descalcificación a través del tiempo tiene un comportamiento fractal, que describe el grado de avance en su secuencia de deterioro.

REFERENCIAS

[1] Newell, James (2011). Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería. Alfaomega.

[2] Athanasiou, K. A. y col. (ago. de 2000). «Fundamentals of biomechanics in tissue engineering of bone». En: Tissue Engineering 6.4, págs. 361-381. issn: 1076-3279. doi: 10 . 1089 / 107632700418083.

[3] Cereatti, A. y col. (feb. de 2010). *«Is the human acetabulofemoral joint spherical?» En: The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume 92*-B, págs. 311-314. doi: 10.1302/ 0301-620x.92b2.22625.

[4] Ammann, P. y R. Rizzoli (mar. de 2003). *«Bone strength and its determinants». En: Osteoporosis International 14, págs. 13-18. doi: 10.1007/s00198-002-1345-4*

[5] González, Luis Alonso, Gloria María Vásquez y José Fernando Molina (mar. de 2009). «Epidemiología de la osteoporosis». En: Revista Colombiana de Reumatología 16, págs. 61-75. doi: 10.1016/s0121-8123(09)70119-7.

[6] Olorunlambe, K. A., D. E. T. Shepherd y K. D. Dearn (jun. de 2019). «A review of acous- tic emission as a biotribological diagnostic tool». En: Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces 13, págs. 161-171. doi: 10.1080/17515831.2019.1622914.

[7] Marcus, Robert y Sharmilla Majumder (2001). «The nature of osteoporosis». En: OSTEOPOROSIS, SECOND EDITION VOLUME 2, CHAPTER 35, págs. 3-17. doi: 10.1016/ b978-012470862-4/50036-2.

[8] Borodich, Feodor M. (1999). «Fractals and fractal scaling in fracture mechanics». En: Inter- national Journal of Fracture 95, págs. 239-259. doi: 10.1023/a:1018660604078.

[9] Balankin, Alexander S. (mayo de 1997). *«Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks». En: Engineering Fracture Mechanics 57, págs. 135-203. doi: 10 . 1016 /s0013- 7944(97)00007-6.*

[10] Caeiro Rey, J. R. y col. (ago. de 2005). «Factores determinantes de la resistencia ósea». En: Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas 14, págs. 67-74. doi: 10.1016/ S1132-8460(05)72686-6.

[11] Edith Miranda, V. y col. (ene. de 2013). «Densitometría ósea». En: Revista Médica Clínica Las Condes 24, págs. 169-173. doi: 10.1016/S0716-8640(13)70142-1.

[12] Sheu, Angela y Terry Diamond (s.f.). «Diagnostic tests: Bone mineral density: Testing for osteoporosis». En: Australian Prescriber 39 (), págs. 35-39. doi: 10.18773/austprescr. 2016.020.

[13] Mecholsky, J.J., D.P. DeLellis y N.A. Mecholsky (ene. de 2020). *«Relationship between fractography, fractal analysis and crack branching». En: Journal of the European Ceramic Society. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.12.061.*

[14] Mecholsky, John J. y Stephen W. Freiman (dic. de 1991). «Relationship between Fractal Geometry and Fractography». En: Journal of the American Ceramic Society 74, págs. 3136-3138. doi: 10.1111/ j.1151-2916.1991.tb04313.x.

[15] Haba, Yvonne y col. (2012). «Relationship Between Mechanical Properties and Bone Mi- neral Density of Human Femoral Bone Retrieved from Patients with Osteoarthritis». En: The Open Orthopaedics Journal 6. url: https : / / dx . doi . org / 10 . 2174 % 5C % 2F1874325001206010458.

[16] Looker, A. C. y col. (ago. de 1998). «Updated Data on Proximal Femur Bone Mineral Levels of US Adults». En: Osteoporosis International 8, págs. 468-490. doi: 10 .1007 / s001980050093.

[17] Osterhoff, Georg y col. (jun. de 2016). *«Bone mechanical properties and changes with osteoporosis». En: Injury 47, S11-S20. doi: 10.1016/s0020-1383(16)47003-8.*

[18] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). *«Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments». En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, pág. 012040. doi:* 10.1088/1757- 899x/ 295/1/012040.

[19] Mendoza, Óscar Javier Espitia, Yuri Hercilia Mejía Melgarejo y Henry Arguello Fuentes (ene. de 2016). «Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual». En: Tecnura 20.47, págs. 119-135. issn: 2248-7638. doi: 10 .14483 /udistrital. jour.tecnura.2016.1.a10.

CAPÍTULO 7

IMPORTANCIA FUNDAMENTAL DE LA VELOCIDAD DE CORTE PARA LOS PROCESOS DE MECANIZADO Y RECTIFICADO EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA METALMECÁNICA

Data de aceite: 03/04/2023

Jayanta Banerjee
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM), Puerto Rico

XV Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica Madrid, España, 22-24 de noviembre de 2022

RESUMEN: La presente ponencia demuestra, tanto analíticamente como por los experimentos de laboratorio, que la velocidad de corte es el parámetro fundamental el cual afecta todas otras variables en los procesos con el arranque de virutas, tales como el mecanizado y el rectificado. Por ejemplo, tanto la tasa de remoción del material como la potencia consumida durante el arranque de virutas mantienen las relaciones directas con la velocidad de corte. También, según la teoría de Taylor, la vida útil de la herramienta de corte depende directamente de la velocidad de corte. Además, la velocidad de corte controla la fricción, el calor y, por lo tanto, la expansión térmica de las superficies de contacto entre la pieza, la herramienta y la viruta. Todos estos factores arriba mencionados son directamente relacionados con la velocidad de corte y afectan el tiempo y el costo de una serie de productos finales en una fábrica metalmecánica de la producción masiva. En resumen, el presente trabajo analiza las variables *determinísticas*, tales como la superficie acabada del producto final, el consumo de potencia, la tasa del arranque de viruta, el uso de lubricantes y refrigerantes, etc., las cuales están afectadas por la velocidad de corte. Además, se observan algunos efectos de la vibración maquinaría, el traqueteo (*chatter*) y el filo adicional o la "falsa cuchilla" *(built-up Edge" BUE*), etc. que producen grietas y marcas de quemadura sobre la superficie del producto final.
PALABRAS CLAVE: Potencia de corte, superficie acabada, tasa del arranque de material, fluidos de corte.

ABSTRACT: The present paper shows, both analytically and with laboratory experiments, that the cutting speed is the fundamental parameter that affects all other variables in the material removal processes, such as, machining and grinding. For example, the material removal rate as well as the power consumed during material removal are in direct relationship with the

cutting speed. Also, according to the theory of Taylor, the tool life depends directly on the cutting speed. Besides, the cutting speed controls friction, heat, and the thermal expansion of the surfaces of contact between the workpiece, the tool, and the chip. All the above-mentioned factors are directly related to the cutting speed, and hence affect the time and the cost of a batch of final products in a metalworking factory of mass production. In sum, the present work analyzes the *deterministic* variables, such as, the surface finish of the final product, the power consumption, the material removal rate, the use of lubricants and coolants, etc. that are affected by the cutting speed. Besides, some of the effects of machinery vibration, chattering, formation of built-up edge etc. that produce cracks and burn marks on the surface of the final product are discussed.
KEYWORDS: Cutting power, surface finish, materials removal rate, cutting fluids.

1 | INTRODUCCIÓN

Considerando el proceso de arranque de virutas en mecanizado, como torneado, fresado, taladrado, etc. y en rectificado y otros procesos abrasivos, conjuntamente como un "sistema cerrado", las "entradas" fundamentales de este sistema son la fuerza de corte y la velocidad de corte. Multiplicando estos dos parámetros, se consigue directamente la potencia de corte. Las "salidas" esenciales del mismo sistema son la rugosidad superficial y la tolerancia dimensional del producto final. Las "pérdidas" del sistema son el volumen de virutas arrancadas y los productos finales rechazados debido a varios defectos ocurridos durante el proceso, tales como las dimensiones y las formas fuera de sus límites de tolerancia, formación de grietas en superficies y subsuperficies del producto final, quemaduras sobre la superficie por el calor concentrado y las marcas de "traqueteo" *(chatter*) por las vibraciones maquinarias. La Figura 1 muestra un tal sistema del proceso de arranque de virutas señalando algunas de las variables arriba mencionadas.
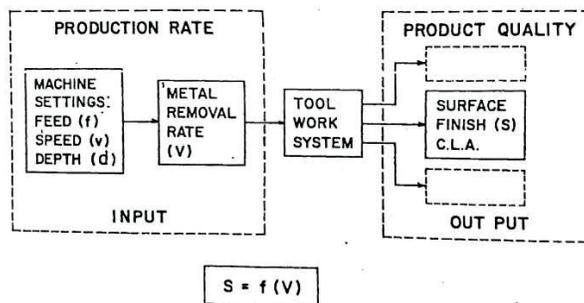
Figura 1. Entradas y salidas de un sistema de manufactura con el arranque de virutas como mecanizado, rectificado y otros procesos abrasivos

2 | EL ANÁLISIS DE ALGUNOS PARÁMETROS ESENCIALES EN MECANIZADO Y RECTIFICADO

2.1 La tasa del arranque de viruta: una "entrada" al sistema de mecanizado y rectificado

En un caso sencillo como tornear una superficie cilíndrica, la tasa del arranque de virutas puede expresarse en una forma sencilla como:

$$V = v \,.\, f \,.\, d \qquad (1)$$

siendo V el volumen de vituta que se arramca en un minuto (mm cúbico/minuto); v la velocidad de corte en mm/minuto (puede cambiarse a metro/minuto, dividiendo por 1000); f el avance de la herramienta (cuchilla) por cada rotación de la pieza cilíndrica (mm/rotación de pieza); d la penetración de la cuchilla por cada pasada (mm). La configuracion del conjunto de la pieza de trabajo (*workpiece*), la formación de viruta, la superficie acabada del producto final y el círculo de fuerzas en el filo de corte se muestran en la Figura 2.
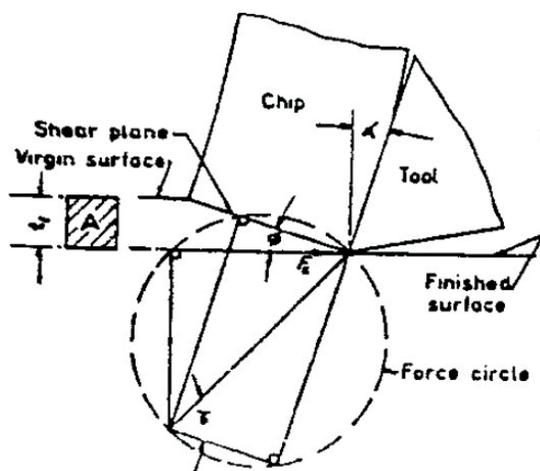
Figura 2. El conjunto de pieza, herramienta y viruta

El margen superior del artículo debe ser de 2,0 cm, todos los demás (inferior, izquierdo, derecho) deben ser de 2,5 cm. Se debe usar un interlineado sencillo (1,0). El cuerpo del artículo debe estar diagramado a dos columnas de 8 cm de ancho y 0,59 cm de espaciado.

2.2 La superficie acabada/terminada del producto final: una "salida" del sistema de mecanizado y rectificado

En Figura 3, se muestra un ejemplo de los experimentos conducidos en un torno horizontal con piezas cilíndricas, usando dos tipos de acero dulce SAE AISI 1020 y SAE AISI

1116 (según las normas de ASTM de EE. UU.). Los resultados experimentales demuestran una relación logarítmica entre la tasa de arranque de material, V, y la superficie acabada del producto final, S (en micrómetro y micro pulgada). Algébricamente, entonces,

$$S = m \log V + C \qquad (2)$$

siendo m y C las constantes de la relación.

Durante estos ensayos se ha tomado un rango de cinco velocidades de corte, entre 2.54 m/min. y 25.4 m/min., que es una amplitud de 10 veces entra la velocidad mínima y la máxima. La tendencia de la relación logarítmica se mantiene la misma, tal como se ve en Figura 3, para las dos clases de acero dulce. Las dimensiones de las piezas cilíndricas fueron 30 mm de diámetro y 300 mm de longitud, y no se observó ningún tipo de flexión, pandeo o abarrilamiento (*barreling)* de la pieza por la fuerza de corte durante el arranque de virutas.
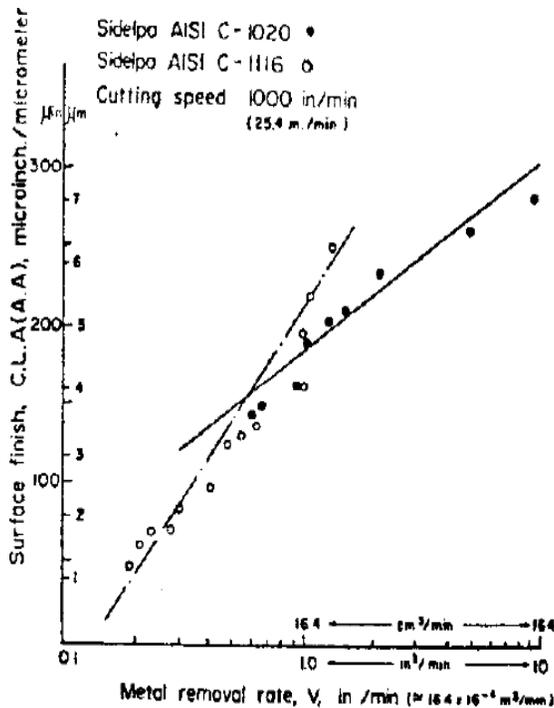
Figura 3. El acabado superficial del producto final como una función logarítmica de la tasa de arranque de material

En la ecuación (1), la variable más amplia en su rango y la más controlable es v, la velocidad de corte. Mayormente, las demás variables como el avance de la cuchilla, f, y su penetración, d, no tienen la misma amplitud de aplicación como la de la velocidad de corte, v, especialmente en las máquinas herramientas de CNC (Control Numérico

Computarizado) , las cuales se utilizan casi siempre en la producción masiva en las industrias metalmecánicas. Cabe mencionar que en los ensayos arriba mencionados de tornear no se ha utilizado ningún fluido de corte, sea lubricante o refrigerante (*coolant*), porque todos los tres parámetros fundamentales de corte, v, f y d fueron dentro de un rango de magnitudes bajas y no hacía falta fluidos de corte para las piezas de acero dulce como AISI 1020.

2.3 El efecto de la velocidad de corte sobre la potencia de corte y la rugosidad superficial del producto final (usando fluidos de corte)

Nuevamente, en algunos ensayos de relativamente alta velocidad se han usado: (1) un fluido de corte en base de una emulsión (mezclas de 50% de aceite de motor W40 en agua; y (2) con un aditivo de disulfuro de molibdeno (MoS2) en la misma mezcla. Se han usado dos diferentes velocidades de corte: 20 m/min. y 50 m/min. Durante los experimentos, se ha usado un vatímetro trifásico para medir la potencia y un rugosímetro "*Surf-indicator*" para medir la rugosidad de superficie del producto final.

Figura 4 indica significativamente menos consumo de potencia, Pc (kW), tanto para la emulsión *Taladrina* como para el aditivo *Molyven*, comparando con el corte seco y para la misma tasa del arranque de virutas, V (la coordinada horizontal). Esta misma tendencia se observa para dos diferentes velocidades de corte, 20 m/min. y 50 m/min.
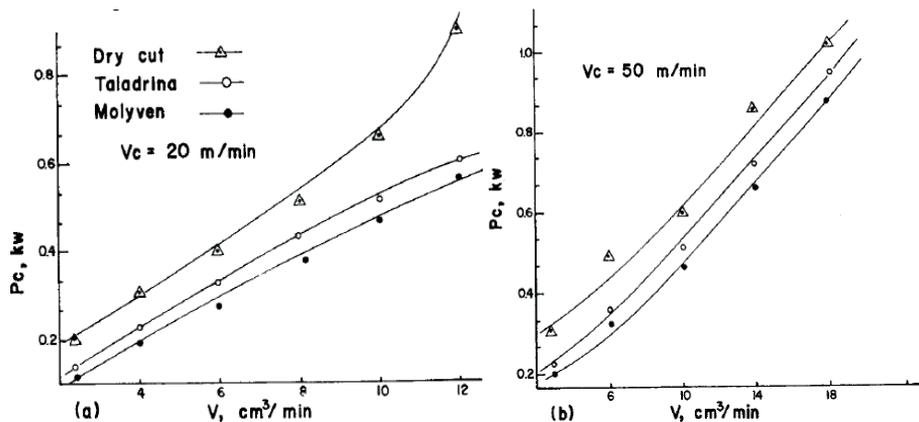
Figura 4. Potencia de corte vs. Tasa de arranque de material para dos diferentes velocidades de corte

Semejantemente, en Figura 5, se observa la misma tendencia en cuanto a la rugosidad de la superficie terminada del producto final, tanto para la velocidad de corte 20 m/min. como la de 50 m/min. La rugosidad de la superficie final se mejoró significativamente con ambos fluidos de corte, tratando de llegar a un valor constante dentro de un rango de la tasa de remoción de virutas V. Dicho rango es por encima de 10 cubic centímetro por minuto para la velocidad de corte 50m/min. y 20 cubic centímetro por minuto para la

velocidad de corte 20m/min.
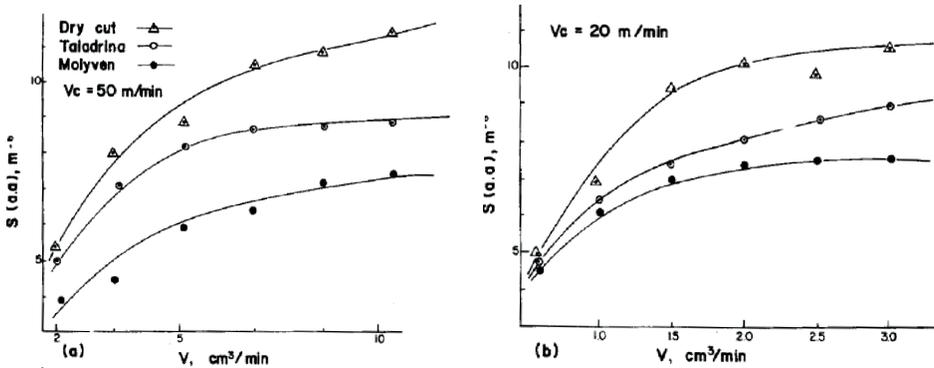
Figura 5. El acabado superficial del producto final vs. la tasa del arranque de material paralas dos velocidades de corte, 20 m/min. y 50 m/min.

2.4 El caso de rectificado: el esmeril (la rueda rectificadora) es una herramienta "Estadística"

En el caso de un esmeril o una rueda rectificadora, cada grano es una herramienta de corte con uno o varios filos de corte para arrancar una viruta o varias virutas. No tiene una geometría determinada, no como en el caso de una broca (barrena) de taladro, una fresa de la máquina fresadora o un cuchillo para tornean. Por eso, el proceso de rectificado o cualquier otro proceso con granos abrasivos, se llama "Mecanizado Estadístico o estocástico" porque la formación y el arranque de las virutas son muy aleatorios. Sin embargo, en Figura 6 se indica la distribución de fuerzas sobre un grano cortante en una rueda esmeril (rectificadora). Esto asemeja con la Figura 2 para la distribución de fuerzas en mecanizado con las herramientas de corte de geometría determinística como el caso de un torno, una fresadora o un taladro.
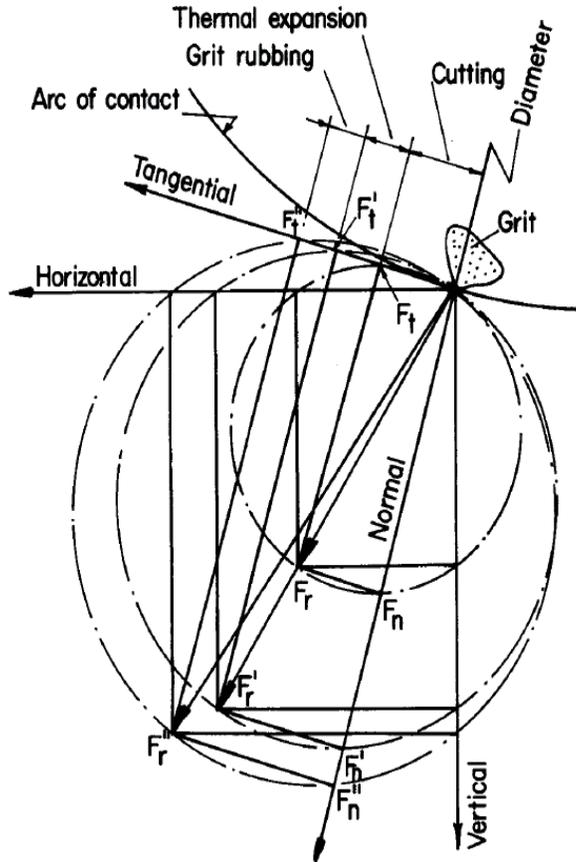
Figura. 6. La distribución de fuerzas sobre un grano de corte en una rueda rectificadora

En un experimento de rectificar la superficie plana de una pieza de acero inoxidable con un fluido de corte (una emulsión de 50% aceite W40 y 50% agua, igual que en el caso de mecanizado en Figuras 4 y 5), se observa en Figura 7 que la fuerza resultante se mantiene una relación lineal con la tasa de arranque del material de la pieza: v.d.f. En esta figura, V es la velocidad tangencial de la rueda esmeril que equivale a la velocidad de corte. Si la velocidad de corte se mantiene constante durante una pasada, entonces la potencia de corte, Pc mantendría también una relación lineal con la tasa del arranque de virutas. Por lo tanto, varios parámetros del rectificado se pueden evaluar *determinísticamente*, igual que en el caso de mecanizado, a pesar de la forma, tamaño y orientación de sus granos cortantes son aleatorios.
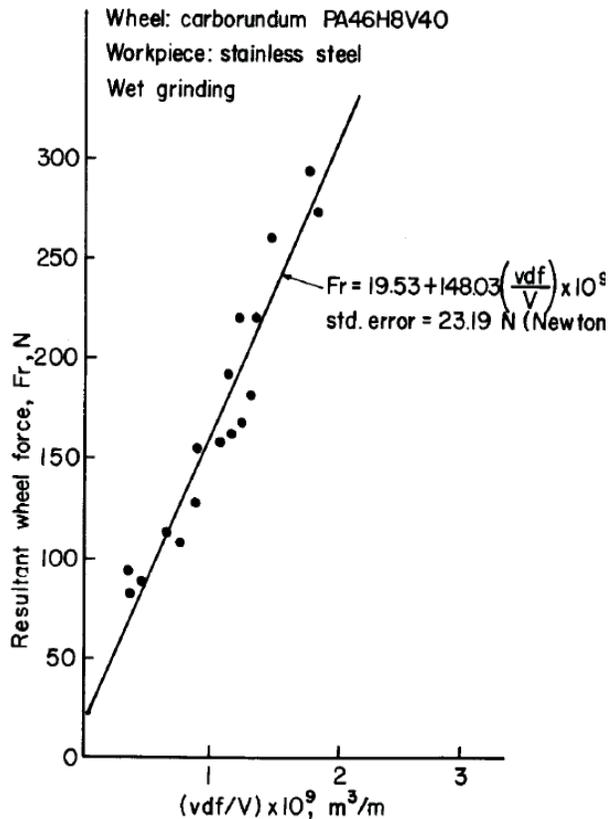
Figura 7. La fuerza resultante vs. la tasa de arranque del material en un rectificado de la superficie plana

2.5 Las variables incógnitas: Efectos de temperatura y la vibración maquinaria

En cualquier proceso de manufactura metalmecánica las variables difíciles de controlar determinísticamente son el calor acumulado dentro de las superficies de contacto, y, en consecuencia, la expansión térmica localizada, el desgaste y la vibración autogenerada de la máquina herramienta. Estos producen los daños por el traqueteo (*chatter*) sobre la superficie del producto final. Figura 8 muestra el alza de temperatura en el centro de una pieza plana debido a la expansión térmica y el consiguiente aumento de la fuerza en cada pasada sucesiva.
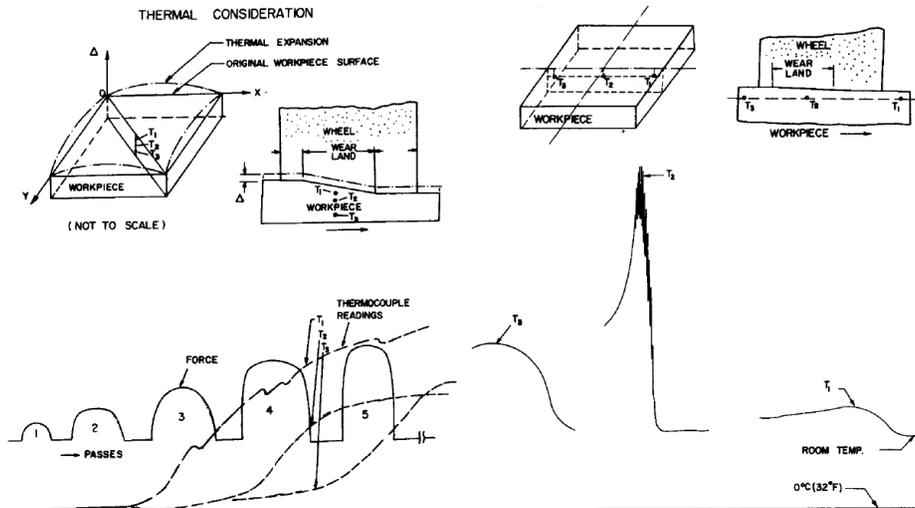
Figura 8. Efectos termales sobre la fuerza de corte

Figura 9 muestra las ondas de traqueteo sobre la pieza en la misma dirección de la velocidad de corte (la dirección del movimiento longitudinal de la mesa de la máquina rectificadora horizontal). También Figura 9 muestra el ciclo de la fluctuación de fuerzas, tanto la vertical como la horizontal, debido al impacto de traqueteo.
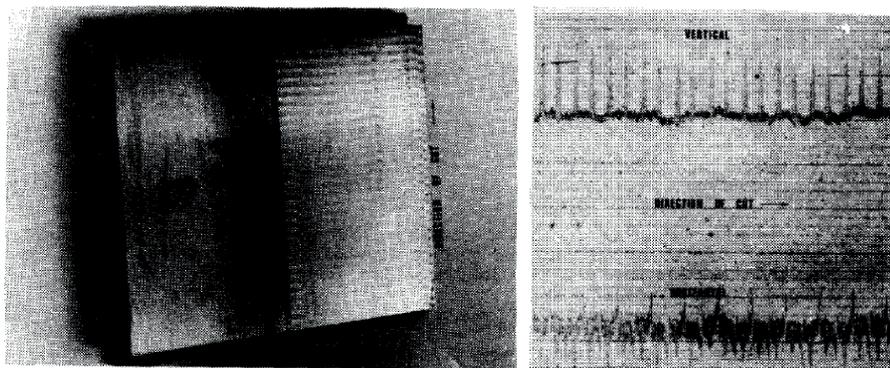
Figura 9. El efecto de traqueteo (chatter) sobre la superficie de y el aumento de fuerzas por el impacto

Figura 10 muestra la red de grietas sobre la superficie de una pieza de acero inoxidable. Son termo-grietas causadas por el calor acumulado y entrapado entre la pieza y la rueda esmeril.

Figura 10. La red de termo-grietas sobre la superficie del producto final

Mientras aumenta la velocidad de corte disminuye la vida útil de la herramienta, según los estudios y la muy conocida ecuación de Taylor. Sin embargo, muy baja velocidad de corte produce la "falsa cuchilla" o un filo adicional frente al principal filo cortante de la herramienta. En consecuencia, esto deteriora la superficie acabada del producto final por la debida acumulación del material en una forma irregular. Figura 11, tomada de la pantalla óptica del microscópico "*shadowgraph*", muestra tal acumulación del material adicional como "secondary Hill" (loma secundaría) en ambos lados de una rugosidad normal de la superficie acabada.
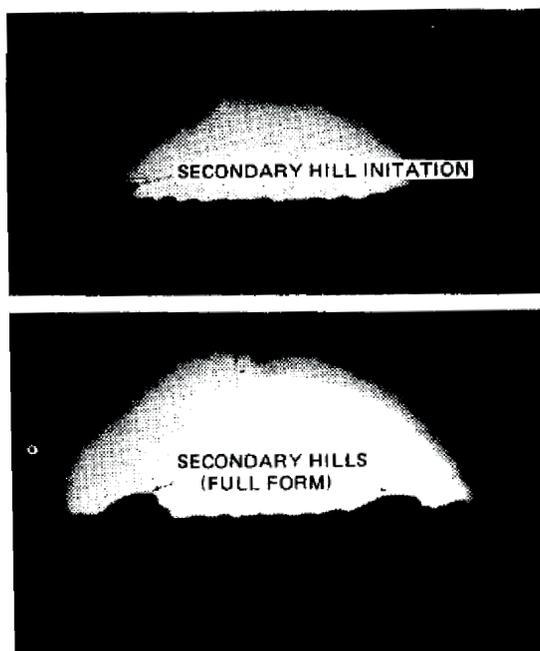
Figura 11. Formación de la "Loma Secundaria" (Secondary Hill) sobre la superficie acabada

2.6 Conclusiones

En base a las observaciones, tanto teóricas como experimentales arriba mencionadas, se puede comentar que la velocidad de corte predomina como un parámetro fundamental en los procesos de remoción del material, sean determinísticos como torneado, fresado, taladrado, etc. (mecanizado) o los procesos aleatorios con los granos abrasivos (rectificado, o cualquier otro proceso de la geometría de corte irregular).

La velocidad de corte es la variable principal para aumentar la tasa de arranque del material, o para disminuir el desgaste de herramienta y aumentar su vida útil (según la muy conocida ecuación de Taylor). Además, la velocidad de corte controla el calor atrapado entre las superficies en contacto de la pieza, herramienta y viruta. Esto afecta directamente la expansión térmica localizada produciendo termo-grietas y marcas de traqueteo sobre las superficies del producto final.

La velocidad de corte cuando inadecuada es la causante de la formación de "Falsa Cuchilla" o un filo adicional frente al principal filo cortante Esto produce el acabado superficial del producto final muy irregular.

Todos los factores arriba mencionados, esencialmente controlados por la velocidad de corte, afectan directamente el costo de manufactura de cada componente. Por lo tanto, la *optimización* de la velocidad de corte es la próxima etapa de este estudio en continuación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco la ayuda del Ing. José Santiago en formatear las figuras de esta ponencia.

REFERENCIAS

[1] M.C. Shaw. Metal Cutting Principles (2nd edition), Oxford University Press, New York, Chapter 3, pp. 16-26,2005.

[2] J. Banerjee. "Fundamental parameters of plasticity for the design of products in mass scale manufacturing in metalworking industries". Proceedings of the Mechanics and Materials in Design (M2D) International Conference, pp. 203 - 204 , 2022, Madeira, Portugal.

[3] M.C. Arteaga, J. Valvedre-Bastides, L. Picha- Quishpe. " Determinación del tiempo de vida del inserto CNMG 12 04 08 PM4325---. Congreso Iberomricano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), 2019, Cartagena, Colombia.

[4] J. Banerjee, A. D. Cintrón. "Optimization of energy consumption and workpiece surface quality in material removal type manufacturing processes". 18th Scientific Convention of Engineering and Architecture, 2016, Havana, Cuba.

[5] Z. Jurcovic, V. Mendic, B. Tadic, D. Purkovic. "Inplimentation of modeling and optimization methods in manufacturing processes". Proceedings of the International Scientific-Expert Conference on Maintenance and Production Engineering (KODIP), pp. 19 – 26, 2011, Herceg Novi, Serbia.

[6] J. Banerjee. "The onset of plastic instability as a criterion for useful defomation in manufacturing processes", Integrity, Relability and Failure (IRF) International Conference, 2020, Porto, Portugal.

[7] J. Banerjee, R. Montosa, A. Pulliza. "Specific cutting energy and other parameters related to machining of composites: effects of friction and lubrication". World Tribology Congress III, 2005, Washington, D.C., USA.

[4] E. Henríquez, M.I. Zepeda. "Elaboración de un artículo científico de investigación". Ciencia y Enfermería, vol. X, n.° 1, pp. 17-21, 2004 [en línea]. Disponible en: http://www.scielo.cl/pdf/cienf/v10n1/art03.pdf

CAPÍTULO 8

USO DA MANUFATURA ADITIVA NA PROTOTIPAGEM RÁPIDA E VANTAGENS FRENTE À PROCESSOS DE USINAGEM: UM ESTUDO DE CASO

Data de submissão: 08/03/2023 *Data de aceite: 03/04/2023*

Victor Abreu dos Santos
Instituto Federal do Amazonas
Manaus – AM
https://orcid.org/0009-0005-2262-5612

RESUMO: Com a crescente demanda de produtos cada vez mais tecnológicos e de fabricação mais rápida e ágil, diferentes maneiras de atender estes requisitos se fazem necessárias. Uma das formas de agilizar a construção de novos itens é a prototipagem rápida que já é usada em escala considerável para pesquisa e desenvolvimento, entretanto a tecnologia de impressão 3D tem ganhado cada vez mais espaço neste meio e trazendo consigo mais benefícios como agilidade de fabricação de protótipos, redução de custos frente aos processos de usinagem comumente utilizados, facilidade de modificações além de possibilitar a criação de peças mais complexas. Demonstrou-se através de uma revisão bibliográfica de artigos, teses, dissertações e livros os conceitos e tecnologias empregadas, bem como uma análise de caso real para construto de ferramental robótico produzido por deposição de material fundido (FDM) em comparação a usinagem em ferramentaria na qual foi possível observar uma redução de 95,44% no custo e 85,71% no tempo de entrega.

PALAVRAS-CHAVE: Prototipagem, manufatura aditiva, impressão 3D.

USE OF ADDITIVE MANUFACTURING IN RAPID PROTOTYPING AND ADVANTAGES OVER MACHINING PROCESSES: A CASE STUDY

ABSTRACT: With a growing demand for technological products and agile manufacturing, different alternatives to active these requirements are needed. One way to speed up new items construction is rapid prototyping, which is already used in large scale for research and development, while 3D printing technology gains more and more space in this field and brings with it benefits such as agility in prototypes manufacturing, commonly used machining processes cost reduction, easely modifications in addition to allow more complex parts creation. It was shown the concepts and technologies employed through a bibliographic articles reviews, theses, dissertations and books, as well as a robotic tool construction by

Fused Deposition Modeling (FDM) real case analysis comparing to machining e tooling. It was possible to observe a 95,44% of costs reduction and 85,71% in delivery time.
KEYWORDS: Prototyping, additive manufacturing, 3D printing.

1 I INTRODUÇÃO

Em meio aos avanços tecnológicos gerados pela agilidade exigida para que novas tecnologias e produtos sejam lançados em busca de abastecer o mercado consumidor, ponto este que é um grande requisito para manter a competitividade entre as grandes empresas, mas não apenas isso como também ter a possibilidade de se destacar entre as concorrentes sendo precursores em novos lançamentos.

Um dos pontos para virada de chave para o avanço da tecnologia foi a inserção das ferramentas de CAD 2D nos processos de criação e desenvolvimento em sequência da adição da modelagem tridimensional e de acordo com Dornelas (2017) atualmente encontram-se empresas diversas oferecendo essa ferramenta , inclusive por meio da internet encontramos algumas dessas ferramentas gratuitamente (*Frewares*). Isso permite não apenas o projeto na ferramenta, como também simulações. Tais ferramentas foram aliadas ao conceito de prototipagem rápida (PR) trazendo como benefício o ganho de tempo e maior praticidade no processo de desenvolvimento, além destas a manufatura aditiva foi introduzida em métodos de PR possibilitando maior celeridade na apresentação para novos produtos.

Embora algumas empresas utilizem impressão 3D, essa tecnologia ainda não é difusa em todos os ramos e níveis de negócios, o que pode trazer certo atraso em relação a alguns concorrentes, tendo em vista que o protótipo pode ser feito de forma mais rápida se as partes podem ser projetadas e testadas mais rapidamente, não somente trazendo mais rapidez, mas também redução de custos diretos e indiretos. No que diz respeito ao processo de produção, permite a produção em pequenas escalas, em menor tempo e utilizando menos material e mão-de-obra do que a produção em massa tradicional (MIETTI E VENDRAMETO, 2000). Tendo em vista que muitas fábricas ainda utilizam o processo de manufatura subtrativa para realizar a fabricação de peças, podendo ser produzidas internamente para aquele que possuem maquinário e profissionais de usinagem ou através da contratação de ferramentarias terceirizadas para confecção.

> Por meio da impressão 3D, inúmeros objetos podem ser fabricados, sendo que a complexidade dos modelos varia de acordo com o sistema e os equipamentos utilizados. As possibilidades incluem desde objetos simples e menos detalhados, como pequenos moldes, até estruturas complexas, como peças para casas, carros, ou, ainda, partes do corpo humano (órteses, próteses, etc.) (MORANDINI; VECHIO, 2020).

Diversas impressoras estão acessíveis não apenas para fabricas e industrias, mas também para interessados sem vínculo com tais instituições. Com a crescente popularização

e facilidade de manuseio a cultura maker através do princípio "*Do your self*" ou "faça você mesmo" diversos profissionais vêm buscando o ramo da manufatura aditiva como meio possível de utilização e estudo. Em diversos países do mundo difundem-se espaços colaborativos de fabricação digital, como os *Makerspaces* e os *Fablabs*, contribuindo para a disseminação do uso das impressões 3D e de outras ferramentas de fabricação para desenvolvimento de projetos segundo Onisaki e Vieira (2019).

Pretende-se com este artigo mostrar o processo de prototipagem rápida através de manufatura aditiva, suas diferentes tecnologias, vantagens de sua adesão aos métodos de pesquisa e desenvolvimento em ambiente industrial através de estudo de caso utilizando a comparação de uma peça modelada para ferramental de um robô colaborativo fazendo comparação dos custos e prazos levantados entre os processos de impressão e usinagem.

2 I BREVE HISTÓRICO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA (PR)

O sistema de prototipagem rápida (PR) é um método que reúne um conjunto de técnicas usadas para fabricar ou projetar de maneira rápida um modelo em escada de um conjunto ou parte de uma montagem e o protótipo é uma maneira de simular alguns aspectos de um produto existente ou ideia. Este processo foi desenvolvido por volta de 1987, através do processo de estereolitografia (SL) pela empresa americana 3D *Systems*, processo esse que solidifica as camadas de um liquido fotossensível denominado de resina, que sofre solidificação através de laser.

Chamado de SLA-1 o primeiro sistema de impressão montado e comercializado nos Estados Unidos deu origem a um novo seguimento na indústria com empresas como Sony e NTT Data passaram a construir e comercializar produtos similares nos anos seguintes e posteriormente na década de 90 sendo vendido uma versão da empresa EOS (*Eletro Optical Systems*) na Alemanha.

A PR é utilizada em diversos ramos que vão desde o educacional ao ambiente fabril e essa difusão da tecnologia trouxe mais celeridade frente aos métodos convencionais de projetar produtos.

> A popularidade da prototipagem rápida relativamente aos métodos tradicionais de construção manual de modelos baseia-se na capacidade de produzir acuradamente peças complexas num curto espaço de tempo. Esse é o aspecto que a diferencia, a rapidez de resultados já com um nível de acabamento que permite a realização de testes específicos, por um baixo custo (PALHAIS, 2015).

Muitas empresas tem investido nesta ferramenta em busca de obter ganhos em tempo e custos diretos e vem ganhando espaço cada vez mais na atualidade. "Atualmente, os protótipos tem uma gama vasta de aplicações, passando pela indústria automotiva, eletroeletrônica, eletrodomésticos, calçados, entre outras", explica Fernando Schmiegelow, diretor de marketing da Sisgraph, empresa pioneira no ramo de impressoras 3D, manufatura

aditiva, desenvolvimento e treinamentos presente no Brasil desde 1980.

Outro fator de extrema importância quando se trata de prototipagem rápida são os Softwares adotados utilizando tecnologia de CAD/CAM. O termo CAD/CAM é um acrônimo das palavras *Computer Aided Design* e *Computer Aided Manufacturing* que significam Desenho guiado por computador e Fabricação guiada por computador (MOURA e SANTOS, 2015).

> Com todo o avanço das técnicas de CAD, tornaram-se frequentes os pacotes de softwares voltados para mecânica computacional, possibilitando ao usuário realizar não apenas o desenho (representação gráfica do projeto), mas também simulações a partir de modelos gerados. Quando não, softwares específicos que utilizem o método numérico de elementos finitos e/ou o método numérico de volumes finitos têm como input modelos construídos com auxílio de softwares de CAD (AMARAL; PINA FILHO, 2010).

Após o surgimento logo foi adicionada no meio industrial como maneira de tornar o desenvolvimento mais rápido e prático com uso de ferramentas como *SolidWorks, SolidEdge* ou *Autodesk Inventor*. Na engenharia mecânica podem ser considerados como os principais aliados à prototipagem, pois através de simulações e testes realizados em ambiente digital, utilizando variáveis mais próximas ao uso real, trazem maior segurança e confiabilidade uma vez que é possível verificar os principais pontos de esforços mecânicos e os riscos de fratura que estes trarão ao projeto ou peça e com isso modificar o item para se manter dentro dos parâmetros aceitáveis caso necessário.

3 I PROCESSOS DE MANUFATURA SUBTRATIVA

O processo de manufatura subtrativa ou usinagem é descrito como a fabricação a partir de um bloco de matéria prima utilizando processos como torneamento, a retificação, fresamento, a eletroerosão por penetração, a eletroerosão a fio e entre outros para remover partes de material do bloco dando a forma desejada até que seja finalizado e se tenha a peça conforme o projeto.

A usinagem convencional é realizada através de processos manuais através das máquinas ou utilizando auxilio de controle numérico por computador ou CNC o qual se faz necessário passar informações a máquina via código para que ela execute os comandos. Como exemplo de equipamento largamente utilizado na usinagem tem-se equipamentos como o torno para usinagem cilíndrica externa ou interna possibilitando assim a retirada de material durante o movimento da peça e de acordo com Matumoto (2016) usinagem acontece pelos movimentos de rotação da peça e translação das ferramentas e nas palavras de existem dois tipos de tornos, os convencionais e os equipados com Comando Numérico.

Procedimentos como a confecção de roscas internas e externas, roletes eletrodos e diversos outros itens podem ser feitos com uso deste equipamento que comumente

é sucedido por outros processos como furação, recartilha e entre outros. Além destes equipamentos fresadora router CNC também são comuns no decorrer da usinagem e funcionam baseando-se em eixos X e Y como primários, contendo de um até mais cinco eixos para operação. Dentre os exemplares mais utilizados desta ferramenta estão o de mesa móvel ou com sistema semelhante a um pórtico móvel tendo sua operação baseado em um sistema intermediário para operação ou controle manual.

> A Router CNC é um equipamento com automação programável. Desse modo, a Router CNC é comandada por intermédio de um sistema numérico computadorizado, o qual aciona um conjunto mecânico no intuito de viabilizar que uma ferramenta de corte se movimente e possibilite flexibilidade e precisão na usinagem de um material. (FRITZEN, 2020, p.2).

No que se refere a fabricação de peça com manufatura subtrativa tem-se duas opções quanto a origem desta atividade sendo feito internamente em de setor de usinagem ou solicitando de fornecedor externo. A fabricação feita internamente representa a necessidade de recursos disponíveis como: maquinário necessário, profissional capacitado para exercer a atividade de operador de máquina de usinagem ou função análoga que possua capacitação mínima requerida, matéria prima, ferramental necessário, materiais de suporte necessário além do tempo desprendido pelo profissional para confeccionar o item requerido. Todos estes itens ser considerados em termos de cálculo de custo e viabilidade para produção de uma unidade produto para teste de conceito ou testes empíricos.

Outra alternativa para a confecção é a solicitação através de uma das diversas empresas terceirizadas que podem fornecer tal serviço e todos os meios necessários para conclusão da solicitação de fabricação. Esta alternativa não possui requisito de mão de obra direta envolvida, bem como a dispensa do cliente em obter infra estruturam para um centro de usinagem, cadeia de compras, gestão de estoque e entre outros fatores que somam ao custo da operação. Entretanto está mais propícia a variações de custo e maiores prazos de entrega de acordo com a disponibilidade da empresa contratada.

4 I TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D

Como visto anteriormente, na história do processo para criação de protótipos a primeira tecnologia associada a manufatura aditiva foi a aestereolitografia denominado de SLA-1 que tem como princípio o uso de resina que solidifica exposta a luz UV gerada pela impressora e a partir deste método outras tecnologias foram criadas e difundidas trazendo uma alternativa para fabricação de peças frente aos processos de usinagem.

> A tecnologia chamada hoje de impressão 3D é a técnica de construir sólidos tridimensionais, camada por camada, umas sobre as outras, até formar o objeto. Essa técnica também é chamada de manufatura aditiva, pois a matéria-prima vai sendo adicionada gradualmente até concluir a construção de um objeto. Este método se difere dos processos de usinagem, onde máquinas controladas computacionalmente vão esculpindo e cortando blocos de

> matéria-prima como plásticos, madeiras e metais, até que se forme o objeto. Por essa diferença, a manufatura aditiva propicia economia de material em relação à usinagem. (AGUIAR, 2016, pg.37).

Com a difusão deste recurso não apenas o ambiente fabril e tecnológico se beneficiou destes benefícios, vários ramos de atividades e segundo Cossetti (2018) setores como aeroespacial, educacional e equipamentos médicos e ortodônticos e se tornaram uma realidade para a PR. Apesar de nomeada como rápida, a prototipagem, dependendo do tamanho e complexidade do objeto desenvolvido pelo CAD, pode demorar entre 3 e 72 horas, no entanto, ainda assim é mais acelerada que processos comuns, que podem demorar dias ou meses para a conclusão do projeto de um protótipo Gorni (2013).

4.1 Fusão por Deposição De Material (FDM)

Este processo é baseado na deposição do filamento extrudado em camadas através de um cabeça de impressão que pode se mover em Sentidos *xy* ou *xz* variando de acordo com o modelo de impressora, sendo estar deposição sob uma mesa aquecida a temperatura inferior à do material, facilitando o endurecimento e por consequência a aderência, seguindo trajeto determinado no software de fatiamento para construção do impresso. Diversos plásticos intitulados de filamentos podem ser utilizados para este método.

> As resinas termoplásticas adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, Policarbonatos, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida. Este processo necessita de um cuidado maior durante o tempo de preparo para o processamento por parte do projetista e/ou operador do equipamento (ALMEIDA, 2007)

De acordo com a necessidade das características desejadas para a peça requerida é feita a seleção do filamento adequado para impressão, além de outras variáveis como velocidade do percurso, temperatura da mesa e cabeça de impressão e entre outros.
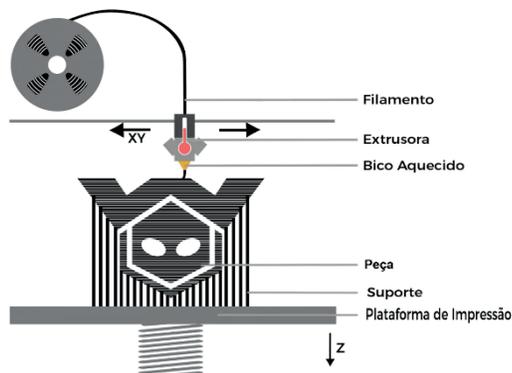
Figura 1: Princípio do processo FDM

Fonte: Adaptado de Wishbox Technologies (2020).

4.2 Estereolitografia (SLA)

Foi o primeiro sistema de processo aditivo usado para PR, em 1987 nos EUA, usando uma resina liquida epóxi, como a resina é líquida e relativamente não viscosa, a impressão ocorre dentro de um tanque com a resina cuja configuração de impressão é definido pelo CAD gerado e processado pelo programa. A forma do material se dá com o contato com o laser de acordo com os comandos enviados ao sistema de varredura. A impressão em SLA permite um alto nível de resolução que pode produzir peças com detalhamento muito superior ao FDM (Finnes, 2015), e por isso é comumente utilizado no âmbito biomédico e até mesmo ortodôntico, uma vez profissionais da odontologia com acesso a ferramenta utilizam um modelo gerado a partir de uma tomografia para mapear e imprimir moldes de seus pacientes.

Entretanto esta ferramenta apresenta a necessidade de um pós processamento em ambiente controlado afim de realizar a cura final para o modelo.
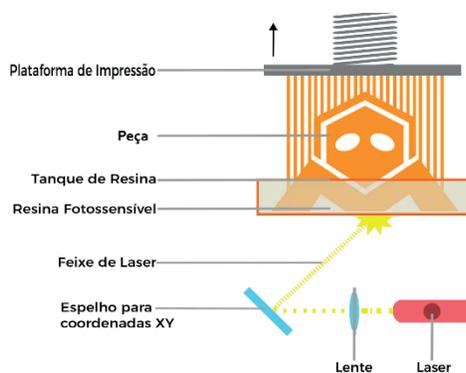
Figura 2: Princípio do processo SLA

Fonte: Adaptado de Wishbox Technologies (2020).

Após a retirada da máquina, o modelo passa por um processo de pós-cura para conferir a máxima resistência. Os modelos podem ser lixados e/ou polidos, e até pintados, conforme desejado, para melhorar sua aparência e função.

> O modelo é então removido da plataforma, retira-se o excesso de resina através de uma lavagem e coloca-o em um compartimento onde ficará exposta a raios UV para a cura final. Este processo de cura pós-impressão permite que os objetos atinjam melhores propriedades mecânicas e tornem mais estáveis (DADDA, 2021).

4.3 Sinterização Seletiva por Laser (SLS)

O processo de sinterização é um dos mais utilizados seguindo os processos FDM que vem ganhando bastante adesão e SLA. Em uma câmara de construção pré-aquecida,

role uma camada de pó correspondente à espessura da camada de construção. Um feixe de laser constrói o modelo fundindo as interfaces do pó, resultando em uma estrutura sólida parcialmente porosa. O conjunto formado de pó é retirado da máquina e submetido a operações de jateamento e/ou imersão para aumentar a resistência mecânica do modelo e melhorar a qualidade da superfície. O processo pode trabalhar com vários tipos de materiais, modelos *True Form* e *Cast Form* (para fundição de modelos perdido) ou ainda pó cerâmico revestido com resina termoendurecível (produção de invólucros cerâmicos).
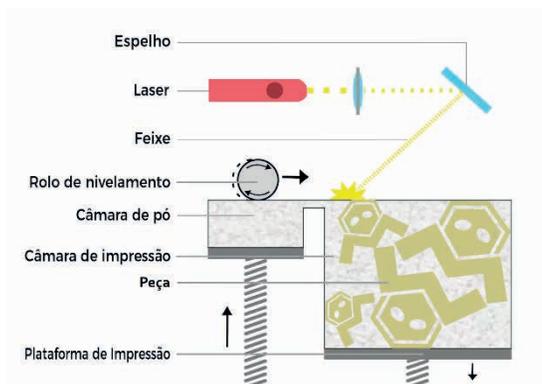
Figura 3: Princípio do processo de SLS

Fonte: Adaptado de Wishbox Technologies (2020).

4.4 Fabricação de Objetos por Camadas (LOM)

A Tecnologia LOM dentre as demais talvez seja a menos utilizada atualmente, porém teve sua importância nos processos de Prototipagem. Segundo Almeida (2007) nesta técnica, camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo são “coladas” umas às outras formando o protótipo. Bobinas de papel laminado avançam sobre a plataforma de impressão e o papel é colado em camadas sucessivas e cortadas com um laser de alta precisão para fixação das camadas um rolo aquecido aplica pressão sobre a camada superior para fixa-lo à base e as camadas posteriores.

O LOM apresenta baixo custo, não forma resíduos gasosos tóxicos e é facilmente automatizado, apresentando uma variedade de materiais que podem ser empregados incluindo papel, metais, plásticos, tecidos e compostos, Cheiram (2020).
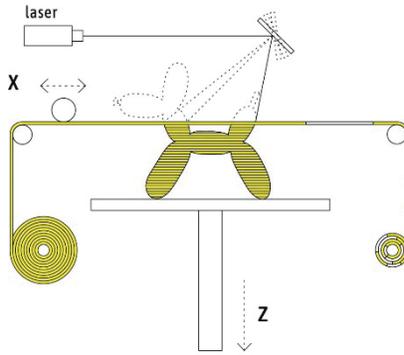
Figura 4: Princípio do processo LOM

Fonte: Melt Collective (2023).

4.5 Comparativo entre as tecnologias de manufatura aditiva

Todas as tecnologias de fabricação aditiva possuem suas vantagens e desvantagens o que pode servir como auxilio na hora de escolher a impressora que melhor se adapta a necessidade da empresa. A tabela a seguir lista as desvantagens e vantagens de cada processo aditivo:

Processo	Vantagens	Desvantagens
SLA	Nível de detalhamento e precisão mais elevados; Permite construir peças praticamente ocas; Impressões com formatos mais complexos; Menos desperdício de material.	Matéria prima com custo mais elevado; Menor resistência mecânica das peças; Elevado tempo de impressão; Necessidade de pós cura; Maior propensão a empenamentos.
FDM	Permite uso simultâneo de mais de dois materiais; Investimento inicial menor; Permite melhores propriedades mecânicas; Matéria prima mais acessível; Maior Facilidade de uso.	Tempo de impressão maior que SLS e LOM; Nível de precisão menor que SLA; Eventual necessidade de acabamento manual.
SLS	Peças confeccionadas em menor tempo comparado a SLA e FDM; Resistencia térmicas e mecânicas elevadas; Não há necessidade de realizar pós cura; Não precisa de suportes (usando termoplásticos).	Modelos com porosidades e superfícies rugosas; Precisão dimensional menor que SLA e LOM; Matéria prima com custo elevado.
LOM	Maior precisão dimensional; Maior precisão geométrica, superior ao SLS, especialmente em *x* e *y*; Capaz de produzir em uma única impressão modelos de maiores volumes; Execução rápida e de baixo custo.	A presença de humidade aumenta instabilidade do papel, podendo trazer prejuízos ao modelo; Precisão dimensional inferior no eixo Z; Peças com espessuras inferiores a 2mm em peças de maior dimensão são difíceis de obter; Grande necessidade de mão de obra.

Quadro 1 – Comparativo das tecnologias mais utilizadas

Fonte: Adaptado de (ALMEIDA, 2007)

5 I ESTUDO DE CASO

Durante a fase de prova de conceito na construção de garra para transporte de aparelhos celulares é necessário realizar testes de diferentes métodos para definição do melhor caminho a ser seguido e com isso diferentes garras são construídas e testadas para satisfazer a necessidade levantada. A Comparação foi feita através de comparação e análise de fatores como: tempo de conclusão da peça, custos envolvidos, mão de obra empresada, gastos secundários empregados e outros fatores. O ambiente proposto para o teste não apresenta local próprio para usinagem o que implica a contratação de serviço externo com fornecedores cadastrados e internamente utilizando impressora 3D Ender 3 da empresa Creality® que utiliza metodologia de impressão FDM de 270W de potência e de matéria prima para construção da peça um filamento de Acrilonitrila butadieno estireno ou simplesmente ABS, na cor Azul. O Software de fatiamento utilizado é o UltimakerCura do ferramental afim de realizar uma análise comparativa foi utilizado um modelo criado de garra do robô colaborativo TM5-900 da empresa ©OMRON que será usado para a análise de métodos e diferentes conceitos e designs de ferramenta foram desenvolvidos e aprovados para etapa de prova e um destes é um dispositivo que fará uso de ventosas pare pega através da tela do aparelho. O Modelo não precisar de resistência mecânica ou térmica elevado tendo em vista que se trata de um estudo de conceito e apenas testes iniciais serão realizados afim de definir aplicabilidade.

Figura 5: Ferramenta escolhida para o teste

Fonte: O Autor

Alguns Fatores levantados como necessários para avaliação de custos da peça construída com Ender 3 como: Consumo elétrico, valor homem-hora trabalhada (HxH), matéria prima, tempo de entrega e entre outras informações contidas na planilha de orçamento padrão utilizada.

O tempo gasto de para fabricação do modelo utilizando o método FDM é de 9 horas

e 05 minutos, contendo suportes que necessitam ser removidos após a impressão e usando um total de 40 gramas de material sendo que apenas 28 gramas são destinados à peça e a diferença é usada para impressão do suporte em estilo árvore com preenchimento de 75%, afim de reduzir o custo e tempo de finalização. Após o fatiamento e impressão fez-se necessário remover os suportes com uso de alicate de corte em aproximadamente 10 minutos e sem mais necessidades de pós cura ou mão de obra adicional.
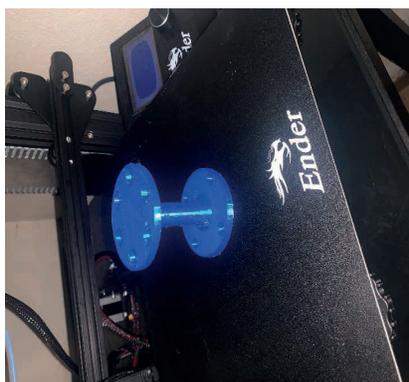
Figura 6: Modelo impresso

Fonte: O Autor

Com relação aos custos envolvidos podemos relacionar o custo com equipamento que inclui não apenas o consumo como também: depreciação, manutenção, demais custos anuais além de matéria prima empregada.

Em contra partida para fabricação externa o fornecedor fará a usinagem e montagem através de aparafusamento utilizando uma placa de Poliacetal (POM) que possui excelentes propriedades dimensional, mecânica e entre outras. Após a comparação para confecção e entrega da peça obtém-se os dados relacionados:

Fatores Comparativos	Peça Usinada	Peça Impressa
Custo mão de obra	-	R$ 9,50
Custo do equipamento	-	R$ 4,34
Matéria prima	-	R$ 3,79
Custo fixo/(HxH)	-	R$ 9,75
Tempo de entrega em dias	7	1
Custo Total estimado	R$ 600,00	R$ 27,39

Tabela 1: Comparação de tempo e custo da peça usinada x impressa

Fonte: O Autor

Com esta breve análise pode-se observar que a alternativa adotada de realizar a montagem através de metodologia aditiva possibilitou a redução em termos de custo a um percentual de 95,44% e reduziu o tempo de entrega em 85,71%.

Considerando os fatores levantado foi possível observar que a impressão da peça foi a conclusão mais viável financeiramente e no que compete ao prazo de entrega. Considerando que os processos de criação e modelagem em ambiente fabril passam por constantes alterações gerando uma necessidade de alteração ou melhoria do protótipo inicial, podemos implicar que em ambientes ou casos que exijam modelos mais complexos e com maior decorrência que eventual a manufatura aditiva é uma opção viável e eficaz na metodologia de desenvolvimento.

6 | CONCLUSÃO

Considerando que o as empresas que usam a PR em sua metodologia de pesquisa e desenvolvimento estão constantemente utilizando e fabricando modelos 3D que não se limitam apenas a uma unidade da peça finalizada, mas a facilidade em realizar alterações de design ou até mesmo de propriedades mecânicas através da alteração das opções de impressão no software de fatiamento. Após verificar os recursos investidos e o tempo de finalização é possível detectar vantagem nestes âmbitos quando se trata de impressão 3D de maneira a reduzir o custo em 95,44% e o prazo em 85,71%.

Além de possíveis atendimentos de prazos de entrega curtos é possível observar que a manufatura aditiva é uma alternativa viável nos processos de prototipagem e pode trazer mais benefícios se inseridos no meio industrial e de pesquisa.

Embora haja um tímido crescimento no uso da tecnologia ainda há muito espaço para o crescimento deste método de fabricação no ambiente industrial trazendo ganhos significativos a curto e médio prazo para a construção de novas tecnologias e desenvolvimento de automações.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Leonardo De Conti Dias. **Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3d na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências**. 2016. 226f. Dissertação (Mestrado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2016.

ALMEIDA, W. J. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHEIRAM, Marlon Leandro Henrique. **Análise da prototipagem rápida por processos de manufatura aditiva e subtrativa utilizando abordagem de decisão multicritério**. 2020. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

COSSETTI, Melissa Cruz. **Como funciona uma impressora 3D**. 2018. Disponível em: https://tecnoblog.net/responde/como-funciona-impressora-3d/. Acesso em: 10 jan. 2023.

DADDA, Henrique Gomes. **Projeto voltado à manufatura aditiva utilizando impressão 3D SLA e otimização topológica**. 2021. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

DO AMARAL, Renato Dias Calado; DE PINA FILHO, Armando Carlos. **A Evolução do CAD e sua Aplicação em Projetos de Engenharia**. 2015.

FERP, UGB; DORNELAS, Geovani. **O uso da tecnologia CAD para o ensino de desenho tecnico no curso de engenharia mecanica**. Simpósio, [S.l.], n. 3, out. 2017. ISSN 2317-5974. Disponível em: <http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/simposio/article/view/379>. Acesso em: 07 fevereiro de 2023.

FINNES, T. **High-definition 3D printing–comparing SLA and FDM printing technologies**. The Journal of Undergraduate Research 13.1, 2015: 3. Disponível em: http://openprairie.sdstate.edu/jur/vol13/iss1/3. Acesso em: 07 fevereiro de 2023.

FRITZEN, Lucas Gustavo. **Projeto estrutural de uma router cnc de baixo custo**. 2020. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Unicesumar, Maringá, 2020.

GORNI, Antonio Augusto. **Prototipagem rápida, a revolução 3D**. 2013. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/Gorni_PI_Nov2013.pdf. Acesso em: 20 dez. 2022.

MATUMOTO, Bruno Haruo. **Análise da eficiência energética em processos de usinagem: comparação de tempo e potência entre torno convencional** e cnc. 2016. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MELT COLLECTIVE (org.). **Laminated Object Manufacturing**. Disponível em: https://meltcollective.com/tool/laminated-object-manufacturing/. Acesso em: 25 jan. 2023.

MORANDINI, Moisés Miranda; VECHIO, **Gustavo Henrique del. Impressão 3d, tipos e possibilidades**. Revista Interface Tecnológica, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 67-77, 18 dez. 2020. Interface Tecnologica. http://dx.doi.org/10.31510/infa.v17i2.866.

MOURA, R. B. B.; SANTOS, T. C. **Sistemas cerâmicos metal free: tecnologia CAD/CAM**. Revista Interdisciplinar, v. 8, n. 1, p. 220-226, janeiro-fevereiro-março, 2015.

ONISAKI, Hadassa Harumi Castelo; VIEIRA, Rui Manoel de Bastos. **Impressão 3D e o desenvolvimento de produtos educacionais**. Revista de Estudos e Pesquisas Sobre Ensino Tecnológico (Educitec), [S.L.], v. 5, n. 10, p. 128-137, 1 mar. 2019. Instituto Federal do Amazonas. http://dx.doi.org/10.31417/educitec.v5i10.638.

PALHAIS, Catarina Bela Cardoso. **PROTOTIPAGEM: uma abordagem ao processo de desenvolvimento de um produto**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design de Equipamento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

PESSOA, J.; MIETTI, M. A.; VENDRAMETO, **O. Uso da prototipagem rápida como fator de competitividade**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2000, Recife. Anais... Recife, 2000.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva**: **tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: E. Blucher, 2017.

WISHBOX TECHNOLOGIES. **14 tipos de impressora 3D: veja como funciona cada uma**. 2020. Disponível em: https://www.wishbox.net.br/blog/tipos-de-impressora-3d/. Acesso em: 15 jan. 2023.

CAPÍTULO 9

UTILIDAD DE LA BIOMASA DEL HONGO *Purpureocillium lilacinum* PARA LA ELIMINACIÓN DE CADMIO (II) DE AGUAS CONTAMINADAS

Data de aceite: 03/04/2023

Ismael Acosta Rodríguez
Laboratorio de Micología Experimental
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.
San Luis Potosí, S.L.P., México.
ORCID: 0000-0001-8620-2727

Adriana Rodríguez Pérez
Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
Centro de Investigación y Extensión de la Zona Media. El Balandran
Cd. Fernández, San Luis Potosí.
ORCID: 0000-0002-6570-6579

Juan Fernando Cárdenas González
bUniversidad Autónoma de San Luis Potosí. Centro de Investigación y Extensión de la Zona Media. El Balandran
Cd. Fernández, San Luis Potosí.
ORCID: 0000-0002-3502-5959

Víctor Manuel Martínez Juárez
Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Instituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.
ORCID: 0000-0002-7426-6835

Dalila del Socorro Contreras Briones
Laboratorio de Micología Experimental
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.
San Luis Potosí, S.L.P., México.
ORCID: 0000-0001-8620-2727

RESUMEN: El objetivo de este trabajo fue analizar en condiciones de laboratorio, la bioadsorción de Cadmio (II) en solución acuosa por la biomasa del hongo contaminante ambiental *Purpureocillium lilacinum,* utilizando el método colorimétrico de la Ditizona, y estudiando diferentes parámetros como la resistencia al metal, pH, tiempo de incubación, temperatura, concentración del metal y de biomasa, además de un ensayo de biorremediación a partir de efluentes contaminados de una laguna de desechos industriales, Se encontró que el hongo crece hasta 300 mg/mL del metal (1.2 mg de peso seco), y las condiciones óptimas para la remoción son un pH de 6.0, 28°C, y una concentración de 50 mg/L del metal, 1 g de biomasa y 32 horas de incubación, eliminando el 56.3% del metal en solución. Además, si se aumenta la concentración del metal,

disminuye la eficiencia de remoción, mientras que, si se aumenta la concentración de la biomasa, también aumenta la remoción . Finalmente, 5 g de biomasa eliminan el 60.1% de Cadmio (II) a partir de aguas contaminadas con 100 mg/L del metal (ajustado) a los 10 días de incubación a 28ºC.
PALABRAS CLAVE: Remoción, cadmio, biomasa fúngica, aguas contaminadas.

ABSTRACT: The objective of this work was to analyze, under laboratory conditions, the bioadsorption of Cadmium (II) in aqueous solution by the biomass of the environmental polluting fungus *Purpureocillium lilacinum*, using the Dithizone colorimetric method, and studying different parameters such as resistance to metal, pH, incubation time, temperature, metal and biomass concentration, in addition to a bioremediation test from contaminated effluents from an industrial waste lagoon. It was found that the fungus grows up to 300 mg/mL of metal (1.2 mg of dry weight), and the optimal conditions for removal are a pH of 6.0, 28°C, and a concentration of 50 mg/L of metal, 1 g of biomass and 32 hours of incubation, removing 56.3% of the metal in solution. In addition, if the concentration of the metal is increased, the removal efficiency decreases, while if the concentration of the biomass is increased, the removal also increases. Finally, 5 g of biomass remove 60.1% of Cadmium (II) from water contaminated with 100 mg/L of the metal (adjusted) after 10 days of incubation at 28ºC.
KEYWORDS, Removal, cadmium, fungal biomass, contaminated water.

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados están directamente relacionados con los riesgos a la salud de los seres vivos, a la contaminación de los suelos, toxicidad en las plantas y los efectos negativos sobre la calidad de los recursos naturales y al medio ambiente. Estos riesgos están relacionados con la toxicidad específica de cada metal, la bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad, siendo el mayor peligro su acumulación en las plantas y su transferencia al humano y los animales (Honores Balcázar, 2022). La distribución de los metales pesados en los diferentes ambientes es de una gran complejidad que involucra diferentes factores, entre los que se encuentran: el potencial redox, pH, contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el nivel de las aguas subterráneas y sus fluctuaciones, entre otros (Arbaiza-Peña, et al., 2022). Recientemente, se han realizado muchos estudios para determinar la concentración de metales pesados en el medio ambiente, como: plomo, mercurio, cromo (VI) y cadmio (Tadic et al., 2021).

El cadmio es un metal pesado de origen natural, que no tiene una función conocida en los seres humanos. Se acumula en el cuerpo humano y afecta principalmente a los riñones, pero también puede causar desmineralización ósea, puede debilitar la función de los pulmones, y se ha sugerido que puede ser cancerígeno (Meter et al., 2019), por lo que se ha reportado el uso de biomasas de diferente origen para la eliminación de éste y otros metales pesados como la bioadsorción de Cadmio por hongos aislados del río Bharalu, en Assam (Dipannita et al., 2021), de Plomo y Cadmio por los hongos *Chaetomium globosum* El26 y *Alternaria alternata* (Zaki et al., 2022), la aplicación de biomasas vivas y muertas

de *Aspergillus versicolor* para el biotratamiento de cadmio (Soleimani et al., 2016), y la biomasa de *Rhizopus* sp. (Apaza-Aquino, et al., 2020). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar la capacidad de remoción de Cadmio (II) en solución acuosa por la biomasa del hongo contaminante ambiental *Purpureocillium lilacinum.*

MATERIAL Y MÉTODOS

Se trabajo con un hongo previamente aislado e identificado (Cárdenas González, *et al*., 2021). Para la obtención de la biomasa, se inocularon 1 x 10^6 esporas/600 mL en medio de caldo tioglicolato, 7 días a 28°C, a 100 rpm. Posteriormente, la biomasa se filtró en papel Whatman No. 1, se lavó 3 veces con agua tridesionizada estéril, se secó 24 h a 80°C, se molió, se esterilizó en matraces Erlenmeyer de 250 mL, y se guardó a temperatura ambiente hasta su uso. Para los análisis de remoción, se utilizaron 100 mL de soluciones de 50 mg/L de Cadmio ($CdCl_2$), ajustando el pH con $HN0_3$ 1N y 1.0 g/100 mL de biomasa en cada matraz, tomando alícuotas de 5 mL a diferentes tiempos, removiendo la biomasa por centrifugación (3000 rpm/5 minutos), y al sobrenadante se le analizó la concentración del metal en solución por el método colorimétrico de la Ditizona a 518 nm (Greenberg *et al*., 1998).

RESULTADOS

La cepa fúngica analizada, creció en diferentes concentraciones del metal (0- 350 mg/L), aunque el crecimiento es menor que en el control sin metal (Figura 1), lo cual sugiere que este hongo puede ser resistente al metal analizado, indicando la presencia de Cadmio (II) en la zona muestreada. Estos resultados son similares a reportes previos, como para *Colletotrichum gloeosporioides,* el cual crece en presencia de 400 ppm del metal (Dipannita *et al*., 2021), algunas proteobacterias que resisten concentraciones entre 200-500 mM de cadmio (Jebril *et al*., 2022), para *A. versicolor*, el cual bioadsorbe 11.63 mg Cd/g de biomasa (Soleimani *et al*., 2016), y para algunas especies de *Trichoderma*, las cuales pueden creer en 500 mg/L del metal (Yaghoubian et al., 2019).
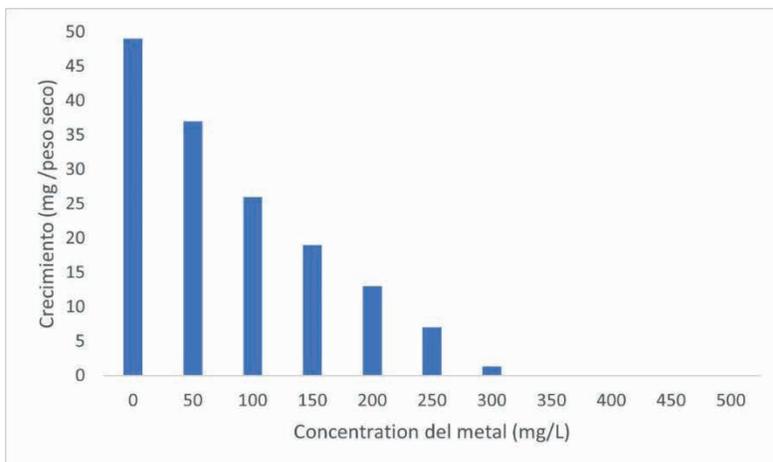
Figura 1.- Crecimiento en peso seco del hongo *Purpureolillium lilacinum* en presencia de diferentes concentraciones de Cadmio (II) (mg/L). 28°C, 7 días de incubación. 100 rpm. pH 5.6.

También, se estudió la capacidad de remoción de cadmio (II) en solución, observando que la biomasa analizada elimina el 56.3% del metal a las 32 horas de incubación bajo las condiciones analizadas (Figura 2), con un pH óptimo de 6.0 (Figura 3), a 28°C (Figura 4), Además, si se aumenta la concentración del metal de 50 a 400 mg/L disminuye drásticamente la remoción de éste (Figura 5), pero si se aumenta la concentración de la biomasa, también aumenta la eliminación de éste, pues con 5 gramos de biomasa se elimina el 100% a las 24 horas (Figura 6).
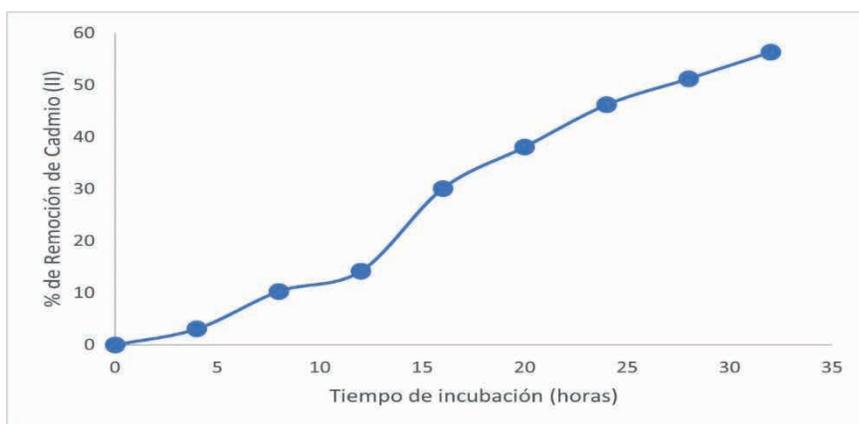
Figura 2.- Efecto del tiempo de incubación sobre la remoción de 50 mg/L de Cadmio (II) por la biomasa del hongo *Purpureolillium lilacinum.* 1 g de biomasa. 28°C, 100 rpm. pH 6.0.
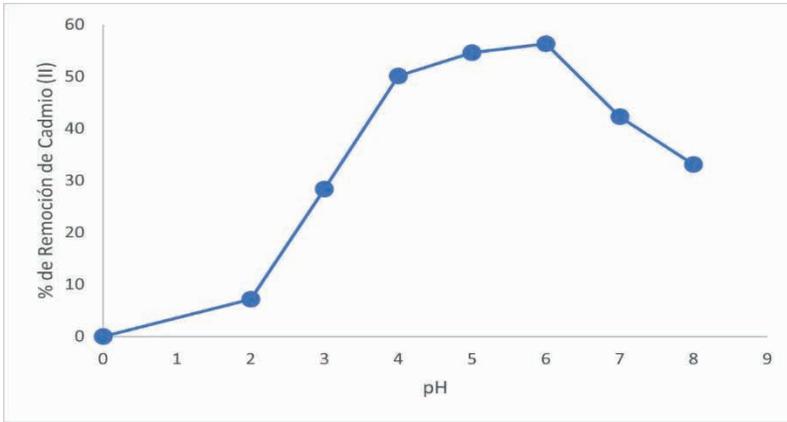
Figura 3.- Efecto del pH sobre la remoción de 50 mg/L de Cadmio (II) por la biomasa del hongo *Purpureolillium lilacinum.* 1 g de biomasa. 28°C, 100 rpm. 32 horas de incubación.
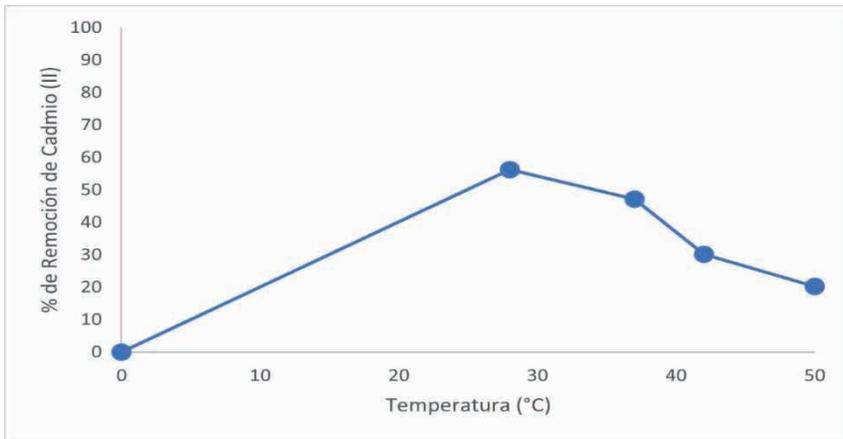
Figura 4.- Efecto de la temperatura de incubación sobre la remoción de 50 mg/L de Cadmio (II) por la biomasa del hongo *Purpureolillium lilacinum.* 1 g de biomasa. pH 6.0, 100 rpm. 32 horas de incubación.
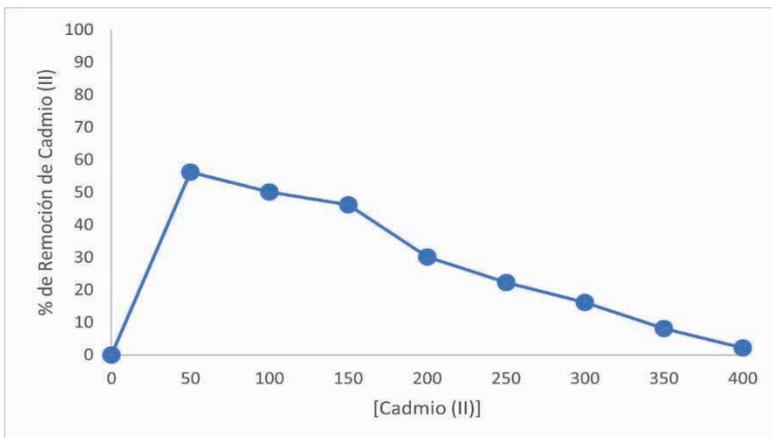
Figura 5.- Efecto de la concentración del metal sobre la remoción de éste, por la biomasa del hongo *Purpureolillium lilacinum.* 1 g de biomasa. 28°C, pH 6.0, 100 rpm. 32 horas de incubación.
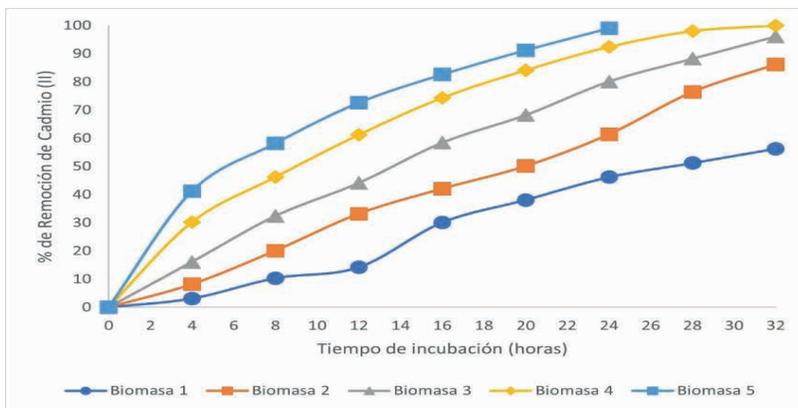
Figura 6.- Efecto de la concentración de biomasa sobre la remoción de 50 mg/L de Cadmio (II). 1 g de biomasa. 28°C, pH 6.0, 100 rpm. 32 horas de incubación.

Finalmente, se realizó un estudio de remoción del metal a partir de efluentes de una laguna de desechos industriales, contaminados con 100 mg/L de Cadmio (II), obteniendo una remoción del 60.1% del metal a los 10 días de incubación, 28°C, 100 rpm, pH 8.2 y 5 gramos de biomasa (Figura 7).
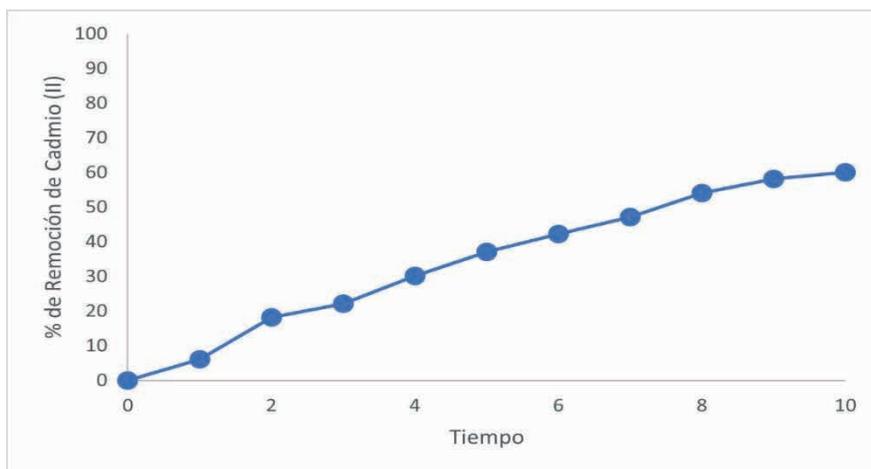
Figura 7.- Remoción de 100 mg/L de Cadmio (II) (ajustado), a partir de efluentes contaminados de una laguna de desechos industriales. 28°C, 100 rpm, 5 g de biomasa, pH 8.2.

Los resultados obtenidos en este trabajo son similares en cuanto a la remoción y algunos de los parámetros analizados, con diferentes reportes de la literatura, para la biosorción del mismo metal con diferentes biomasas (Gutiérrez *et al*., 2021; Dipannita *et al*., 2021; Soleimani *et al*., 2016; Apaza-Aquino y Valderrama Valencia, 2020; Jebril *et al*., 2022; Cerron *et al*., 2020; Zaki et al., 2022).

CONCLUSIONES

El hongo analizado, remueve eficientemente el metal analizado, y puede ser una alternativa para la eliminación de éste de sitios contaminados, con un 56.3% a las 32 horas de incubación, 50 mg/L, 28°C, l100 rpm, pH 6.0, 100 rpm y 1 g de biomasa, por lo que, su aplicación es viable para el tratamiento de aguas contaminadas, además, la biomasa utilizada es natural, de fácil obtención, manejo y costo accesible.

REFERENCIAS

Apaza-Aquino, H. y Valderrama-Valencia, MRE. 2020. Eficiencia de la biomasa de *Rhizopus* sp en la remoción de cadmio (II). Universidad Nacional del Altiplano. Revista de Investigaciones de la Escuela de Posgrado. 9(4):1805-1816.

Arbaiza-Peña, A.K, Panduro-Pisco; G., Díaz-Zúñiga, E.J., Guadalupe-Baylon, N.K., Angulo-García, N. y Iannacone, J. 2022. Composición elemental y de metales pesados en los residuos de palma en la amazonia peruana. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 25(083): 1-11.

Cárdenas González, J.F., Acosta Rodríguez, I., Terán Figueroa, Y., Lappe Oliveras, P., Martínez Flores, R. y Rodríguez Pérez, A.S. 2021. Biotransformation of Chromium (VI) via a Reductant Activity from the Fungal Strain *Purpureocillium lilacinum*. Journal of Fungi. 7(1022). 1-14.

Dipannita D., Pinky B., Nirjanta, Devi N.N. y Mayuri Ch. 2021. Biosorption of Cadmium by Fungi Isolated from Bharalu River, Assam. Journal of Tropical life Science. 11(3): 279-284.

Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. & Eaton, A.D. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18a. ed. American Public Health Association. Washington DC. 3.107.

Gutiérrez, P., Aradillas, D. y Acosta, I. 2021. Aplicación de la biomasa de *Eichhornia crassipes* en la remoción de Cd^{+2} en aguas contaminadas por desechos industriales. Avances en Ciencias e Ingeniería. Vol. 12 (3), 17-29.

Honores Balcázar, César Francisco. 2022. Tratamiento de aguas y suelos contaminados por cd y pb utilizando microoganismos y enmiendas para mejorar la fitoextracción: Revisión sistemática. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad Cesar Vallejo. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.

Jebril, N., Boden, R. y Charlotte Braungardt, Ch. 2022. Cadmium resistant bacteria mediated cadmium removal: a systematic review on resistance, mechanism and bioremediation approaches. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1002 012006. 1-25.

Meter A., Atkinson R.J. y Laliberte B. 2019. Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe – Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. Bioversity International, Roma, octubre 2019. 1-83.

Soleimani N., Fazli MM., Ramazani A., Reza Mehrasbi. 2016. Application of Live, Dead, and Dried Biomasses of *Aspergillus Versicolor* for Cadmium Biotreatment. Journal of Human, Environment, and Health Promotion. 1(2): 87-98

Tadic M., Bigovic M., Djurovic D., Jakic M. y Nikolic I. 2021. Simultaneous removal of Cu^{2+}, Zn^{2+} and Cd^{2+} of aqueous solutions by alcali activated slag. Periódica Polytechnica Chemical Engineering. 63(3): 389-399.

Yaghoubian Y., Ataollah Siadat S., Moradi Telavat MR., Pirdashti H. y Yaghoubian I. 2019. Bio-removal of cadmium from aqueous solutions by filamentous fungi: *Trichoderma* spp. and *Piriformospora indica.* Environmental Science and Pollution Research. 26:7863–7872.

Zaki AG., Hasanien YA. Y Abdel-Razek AS. 2022. Biosorption optimization of lead(II) and cadmium(II) ions by two novel nanosilica immobilized fungal mutants. Journal of Applied Microbiology. Epub ahead of print. PMID: 35578549.

SOBRE A ORGANIZADORA

AMANDA FERNANDES PEREIRA DA SILVA - Graduada em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA), é Mestranda em Ciência e Engenharia dos Materiais pelo Programa de Pós-Graduação (PPGCM) da Universidade Federal do Piauí (UFPI) e foi Aluna Especial na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Atua na área de pesquisa Materiais Magnéticos, Semicondutores e Semicondutores Magnéticos Diluídos com aplicações antibacterianas sob orientação do Professor Doutor Ramón Raudel e Professora Doutora Francisca Araújo. Além disso, seus temas de interesse são: Construção Civil, Patologia das Construç**ões**, Materiais da Construção Civil, Perícia Judicial, Concreto, Análise do Comportamento de Solos, Ensino de Engenharia e Educação à Distância.

A

Aguas contaminadas 107, 108, 113

Argamassa convencional 1, 3, 6, 9, 11, 13

Articulaciones coxofemorales 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 31, 65, 66, 67, 71, 74, 78

Articulaciones de cadera 16, 19, 25, 26, 27, 31, 62, 63, 64, 65

B

Biomasa fúngica 108

C

Cadmio 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113

Cola branca 1, 2, 3, 4, 13

Comportamiento fractal 62, 68, 72, 76, 78

Construção civil 1, 3, 7, 15, 115

Contaminación 56, 57, 59, 60, 108

Contaminante ambiental 107, 109

Cultura del agua 56, 57, 58, 59

D

Deposição de material fundido 93

Desgaste 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 62, 63, 65, 67, 69, 88, 91

Dimensión fractal 62, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78

E

Efluentes 107, 112

Engenharia 14, 81, 96, 104, 105, 115

Estación de bombeo 43, 46

F

Fluidos de corte 81, 85

G

Golpe de ariete 43, 48, 49, 54

I

Impressão 3D 104, 105

M

Manufatura aditiva 93, 94, 95, 97, 98, 101, 104, 105, 106

Metal 92, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113

Modelos físicos 35, 36

O

Osteopenia 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 62, 65, 71, 72, 74, 77, 78

Osteoporosis 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 62, 63, 64, 65, 74, 75, 76, 77, 78, 79

P

Potencia de corte 81, 82, 85, 87

Processo de estereolitografia 95

Prototipagem 93, 94, 95, 96, 98, 100, 104, 105

Purpureocillium lilacinum 107, 108, 109, 113

PVAc 1, 2, 3, 4

R

Remoción 81, 85, 91, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113

S

Servicios públicos en Córdoba 43

Superficie acabada 81, 83, 84, 90, 91

Sustentabilidad 58, 61

T

Tasa de desgaste 16, 19, 21, 23, 24, 27, 29, 30, 31, 32

Tasa del arranque de material 81, 86

Tejidos óseos 18, 19, 20, 21, 62, 64, 65, 66, 67, 69, 77

Tenacidad al desgaste 16, 17

Transporte de sedimentos 35, 36, 37

Tratamiento 56, 59, 60, 113

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

INGENIERÍA

Desenvolvimiento de procesos y productos

Ano 2023

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

INGENIERÍA

Desenvolvimiento de procesos y productos